

# **KALIBRASI BEBERAPA SURVEI METER TERHADAP RADIASI SINAR-X ENERGI RENDAH**

## **SKRIPSI**

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Sains dalam bidang fisika

oleh :  
**Maharani Suci Rajapadni**  
**115090301111-017**



**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**MALANG**  
**2015**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**  
**KALIBRASI BEBERAPA SURVEI METER TERHADAP**  
**RADIASI SINAR-X ENERGI RENDAH**

**Oleh :**

**Maharani Suci Rajapadni**  
**115090301111-017**

**Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji**  
**pada tanggal .....**  
**dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar**  
**Sarjana Sains dalam bidang fisika**

**Pembimbing I**

**Pembimbing II**

**Dr. rer. nat. Abdurrouf, S.Si., M.Si.**  
**NIP. 197209031994121001**

**Dra. C. Tuti B., M.Si.**  
**NIP. 196011271986032004**

**Mengetahui,**  
**Ketua Jurusan Fisika**  
**Fakultas MIPA Universitas Brawijaya**

**Sukir Maryanto, Ph.D**  
**NIP. 197106211998021001**

## **LEMBAR PERNYATAAN**

**Saya yang bertanda tangan di bawah ini :**

**Nama : Maharani Suci Rajapadni**  
**NIM : 115090301111017**  
**Jurusan : Fisika**  
**Penulis Skripsi Berjudul :**

### **Kalibrasi Beberapa Survei meter Terhadap Radiasi Sinar-X Energi Rendah**

**Dengan ini menyatakan bahwa :**

- 1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.**
- 2. Apabila di kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.**

**Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.**

**Malang, ..... 2015**  
**Yang menyatakan,**

**(Maharani Suci Rajapadni)**  
**NIM. 115090301111017**

# **KALIBRASI BEBERAPA SURVEI METER TERHADAP RADIASI SINAR-X ENERGI RENDAH**

## **ABSTRAK**

Penelitian mengenai kalibrasi beberapa survei meter terhadap radiasi sinar-X energi rendah sesuai dengan ISO 4037-4 bertujuan untuk mengetahui kebergantungan dari beberapa survei meter yang digunakan terhadap energi radiasi. Energi sumber radiasi sinar-X yang digunakan adalah energi dari 12,6 hingga 20,7 keV. Lima jenis survei meter digunakan untuk diketahui kebergantungannya terhadap radiasi sinar-X energi rendah. Tiga diantaranya merupakan survei meter dengan detektor Geiger-Mueller (GM), satu jenis detektor kamar pengion dan satu jenis detektor sintilasi NaI(Tl) jendela tipis. Energi radiasi sinar-X yang banyak digunakan dalam bidang industri adalah energi rendah. Selama ini, survei meter tersebut dikalibrasi dengan sumber radioaktif yang memiliki energi tinggi yaitu  $^{137}\text{Cs}$  (661,64 keV). Oleh karena itu penelitian tentang kalibrasi survei meter sinar-X pada energi rendah sangat penting untuk dilakukan. Peraturan mengenai kalibrasi survei meter termaktub dalam Peraturan Kepala Bapeten No.6 Tahun 2009 yang menyatakan bahwa survei meter perlu dikalibrasi sesuai dengan energi yang digunakan di lingkungan kerja radiasi. Dengan demikian estimasi dosis yang diterima pekerja radiasi dalam level proteksi radiasi dapat dihitung dengan tepat. Dari Penelitian ini diperoleh bahwa survei meter dengan kebergantungan terhadap energi paling rendah dimiliki oleh survei meter dengan detektor kamar pengion, sedangkan survei meter dengan detektor GM dan detektor sintilasi NaI(Tl) memiliki kebergantungan terhadap energi yang tinggi.

Kata kunci : Sinar-X energi rendah, ISO 4037-4, survei meter, detektor.

# **CALIBRATION OF SURVEY METERS IN LOW ENERGY X-RAYS**

## **ABSTRACT**

In this work, survey meters were calibrated in low energy X-rays based on ISO 4037-4:2004 to study their relation to energy dependence. Five survey meters were studied on relation to their energy dependence. Three of them are used Geiger-Mueller (GM) detector, one of them is used ionization chambers detector, and the other used NaI(Tl) scintillation thin-widow detector. Three low energy X-rays fields were established, with energies between 12,6 and 20,7 keV. All this time, survey meters were calibrated in radioactive source with high energy  $^{137}\text{Cs}$  (661,64 keV). Therefore it is important to do this work to find out that survey meters need to be calibrated appropriate with the energy radiation that used in area corresponding to Regulatory Head of Bapeten No.6 : 2009. Thus estimates of radiation doses received by workers in radiation protection level can be calculated exactly. Provided that the survey meter with the lowest energy dependence is owned by a survey meter with ionization chambers detector, while a survey meter with GM and scintillation NaI(Tl) detectors has a high dependence on energy.

Key words : Low energy X-rays, ISO 4037-4, survey meter, detector.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa dipanjatkan kepada Allah SWT atas segala nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan Tugas Akhir dengan judul “*Kalibrasi Beberapa Survei meter Terhadap Radiasi Sinar-X Energi Rendah*” serta dapat menyelesaikan tulisan ini dengan sebaik-baiknya. Sholawat dan salam selalu tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Dalam pelaksanaan dan pembuatan laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapat banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tersayang, Bapak Arief Witjaksono dan Ibu Elok Hidayati, adek yang tersayang (Narendra Praja K. S.), my homie lover and friend Ferry Anggriawan dan seluruh keluarga yang selalu memberi bantuan, semangat, dukungan, nasehat, serta doa kepada penulis
2. Sukir Maryanto, SSi., MSi., PhD. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang
3. Dr. rer. nat. Abdurrouf, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing I
4. Dra. Caecilia. Tuti Budiantari, M.Si. dari PTKMR BATAN selaku Dosen Pembimbing II
5. Drs. Bunawas, APU dari PTKMR BATAN yang selalu memberikan bantuan dan nasehat tentang penelitian ini
6. Seluruh staff dan karyawan Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN) Pasar Jum’at Jakarta Selatan, Kepala dan staff Unit Kalibrasi, KKPR, Dosimetri, serta kepada Pak Assef, Bu Nur, Pak Fendi, Pak Edi, Pak Rio, Bu Farida, Pak Dani, dan Pak Yana yang banyak membantu selama pelaksanaan Tugas Akhir ini
7. Seluruh pihak Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Pusat, Laboratorium Metrologi Radiasi Nasional, Mampang, Jakarta Selatan
8. Seluruh teman-teman Fisika UB, terutama angkatan 2011, terima kasih atas doa, semangat, dan dukungannya. Serta kepada Sukma, Yaya, Firli, Irene, Ogy, Lia, dan Nur yang menemani serta bersama-sama menjalani tugas Akhir ini.

9. Serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam melaksanakan Tugas Akhir ini.

Akhir kata, penulis memohon maaf atas segala kekurangan baik dalam pelaksanaan atau penyusunan laporan Tugas Akhir ini. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan. Aamiiin. Saran atau kritik dapat disampaikan melalui email [rha.maharani@gmail.com](mailto:rha.maharani@gmail.com).

Malang, 3 Agustus 2015

**Penulis**

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Radiasi .....	5
2.1.1 Radiasi pengion .....	5
2.1.2 Radiasi non pengion .....	6
2.2 Besaran dan Satuan Radiasi .....	6
2.2.1 Kerma .....	6
2.2.2 Paparan ( <i>Exposure</i> ) .....	7
2.2.3 Dosis serap.....	7
2.2.4 Dosis ekivalen .....	8



2.2.5 Dosis ekivalen ambient .....	10
2.3 Sinar-X.....	11
2.3.1 Proses terjadinya sinar-X .....	11
2.3.2 Pesawat sinar-X.....	12
2.3.3 Interaksi sinar-X dengan materi .....	14
2.4 Kualitas radiasi ( <i>Radiation quality</i> ) .....	16
2.5 Jenis Detektor Radiasi .....	16
2.6.1 Detektor ionisasi gas .....	17
2.6.2 Detektor sintilasi .....	20
2.6.3 Detektor semikonduktor .....	21
2.6 Kalibrasi Alat Ukur Radiasi .....	22
2.7 Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Industri.....	23
2.8 Bahaya Radiasi Sinar-X .....	27
2.9 Proteksi Radiasi.....	30

### BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	33
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	33
3.3 Tahap Penelitian.....	34
3.3.1 Pengecekan kestabilan sistem dosimeter.....	34
3.3.2 Pengecekan nilai kualitas radiasi sumber sinar-X energi rendah .....	35
3.3.3 Pengukuran laju kerma udara standar pesawat sinar-X.....	36
3.3.4 Kalibrasi survei meter .....	38
3.3.5 Perhitungan data laju kerma udara standar....	40
3.3.6 Perhitungan faktor kalibrasi survei meter .....	41

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengecekan Stabilitas Sistem Dosimeter .....	45
4.2 Hasil pengecekan nilai kualitas radiasi.....	46
4.3 Hasil Pengukuran Laju Kerma Udara Standar.....	47
4.4 Hasil Kalibrasi Survei meter .....	51

## BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA.....	59
---------------------	----

LAMPIRAN .....	63
----------------	----

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Daya tembus radiasi .....	5
Gambar 2.2 Dosis ekivalen ambient pada kedalaman d dalam bola ICRU, $H^*(d)$ .....	10
Gambar 2.3 Proses pembentukan sinar-X <i>Bremsstrahlung</i> .....	11
Gambar 2.4 Proses pembentukan sinar-X karakteristik .....	12
Gambar 2.5 Bagian Tabung Sinar-X .....	13
Gambar 2.6 Skema efek fotolistrik .....	14
Gambar 2.7 Skema efek compton .....	15
Gambar 2.8 Skema produksi pasangan .....	16
Gambar 2.9 Skema detektor ionisasi gas .....	17
Gambar 2.10 Daerah kerja detektor ionisasi gas .....	18
Gambar 2.11 Skema percikan cahaya pada kristal sintilator .....	20
Gambar 2.12 Proses di dalam tabung photomultiplier .....	21
Gambar 2.13 Rangkaian listrik pada detektor semikonduktor .....	21
Gambar 2.14 Skema metode kalibrasi .....	22
Gambar 2.15 Prinsip kerja gauging transmisi .....	24
Gambar 2.16 Skema gauging hamburan balik .....	25
Gambar 2.17 Skema teknik analisis XRF .....	26
Gambar 2.18 Skema teknik analisis XRD .....	27
Gambar 2.19 Efek kulit kemerahan ( <i>reddening</i> ) .....	29
Gambar 2.20 Efek terbakar pada jari .....	29
Gambar 2.21 Efek pengelupasan kulit .....	30
Gambar 3.1 Pengecekan stabilitas sistem dosimeter dengan sumber Sr-90. (a) Ruang penyinaran; (b) Ruang kontrol .....	35
Gambar 3.2 Skema pengukuran laju kerma udara standar pesawat Sinar-X .....	37
Gambar 3.3 Skema kalibrasi survei meter .....	39
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian .....	43
Gambar 4.1 Karakteristik pengukuran detektor .....	49
Gambar 4.2 Kurva kalibrasi survei meter atomtex, Inspector dan RadEye .....	52
Gambar 4.3 Kurva kalibrasi survei meter ludlum M-15 .....	52
Gambar 4.4 Kurva kalibrasi survei meter Babyline-31A .....	53

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Faktor bobot radiasi .....	9
Tabel 2.2 Faktor Bobot Organ .....	9
Tabel 2.3 Jenis aplikasi gauging transmisi .....	24
Tabel 2.4 Jenis aplikasi gauging hamburan balik .....	25
Tabel 2.5 Nilai Batas Dosis .....	31
Tabel 3.1 Karakteristik kualitas radiasi sinar-X energi rendah .....	36
Tabel 3.2 Karakteristik survei meter .....	38
Tabel 3.3 Faktor kalibrasi detektor ionisai 2575 volume 600cc .....	41
Tabel 3.4 Faktor konversi .....	41
Tabel 4.1 Hasil pengecekan kestabilan sistem dosimeter .....	45
Tabel 4.2 Pengecekan nilai kualitas radiasi .....	46
Tabel 4.3 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 15 kV .....	47
Tabel 4.4 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 20 kV .....	48
Tabel 4.5 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 25 kV .....	48
Tabel 4.7 Faktor kalibrasi survei meter .....	51

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Gambar Alat dan Bahan .....	63
Lampiran 2. Skema Pengukuran Kalibrasi Survei meter .....	67
Lampiran 3. Rumus Ketidakpastian .....	69
Lampiran 4. Pengecekan Nilai Kualitas Radiasi Sumber Sinar-X Energi rendah .....	71
Lampiran 5. Data Hasil Pengukuran Laju Kerma Udara Standar...	74
Lampiran 6. Deviasi pengukuran Laju Kerma Udara Standar.....	77
Lampiran 7. Linearitas Detektor Ionisasi Tipe 2575 C 600 cc .....	78
Lampiran 8. Data Hasil Pengukuran Survei meter. ....	80



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Radiasi merupakan salah satu cara perambatan energi dari suatu sumber energi ke lingkungannya tanpa membutuhkan medium atau bahan penghantar tertentu [1]. Energi radiasi dapat berupa gelombang atau aliran partikel [2]. Disadari atau tidak bahwa penduduk di dunia selalu mendapat radiasi yang berasal dari berbagai sumber radiasi, baik yang berasal dari alam maupun sumber radiasi buatan [3]. Banyak bentuk radiasi yang terdapat di alam, salah satunya adalah radiasi sinar-X yang termasuk dalam ranah spektrum gelombang elektromagnetik.

Sinar-X memiliki panjang gelombang karakteristik dengan rentang antara 0.1 hingga 100 Å. Sejak awal penemuan sinar-X oleh Wilhem Conrad Röntgen pada tahun 1895, sinar-X telah digunakan pada berbagai aplikasi dalam bidang medis dan teknologi. Dalam perkembangannya, sinar-X banyak digunakan untuk melakukan kontrol, analisis elemen dan struktur dari suatu material [4].

Salah satu jenis sistem kontrol yang memanfaatkan aplikasi teknik nuklir adalah gauging. Gauging digunakan untuk mengukur tebal, ketinggian, densitas, sebagai kendali mutu atau proses produk [5]. Sedangkan jenis sistem analisa yang memanfaatkan aplikasi teknik nuklir adalah reaksi induksi radiasi foton terhadap materi yang dianalisis seperti fluorensi sinar-X (XRF) dan difraksi sinar-X (XRD). Sinar-X yang banyak digunakan dalam bidang industri khususnya bidang elektronik adalah sinar-X rendah. Sinar-X energi rendah dinyatakan dalam ISO 4037-4:2004 *X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy* [6].

Radiasi sinar-X tidak dapat dirasakan langsung oleh indera yang dimiliki oleh manusia serta dapat menembus bahan. Oleh karena itu mutlak diperlukan suatu alat ukur yang dapat memberikan informasi laju dosis radiasi [7]. Survei meter merupakan salah satu alat ukur radiasi yang dapat memberikan informasi laju dosis radiasi pada suatu area secara langsung. Setiap alat ukur proteksi radiasi harus dikalibrasi secara periodik oleh instansi yang berwenang. Hal

ini dilakukan untuk menguji ketepatan nilai yang ditampilkan alat terhadap nilai sebenarnya. Rantai pengukuran kalibrasi dosimetri terdiri atas tiga tahapan yakni standar primer, standar sekunder, dan sistem alat ukur radiasi yang digunakan oleh pengguna di lapangan. Nilai standar primer didapatkan dari hasil pengukuran atau eksperimen dari laboratorium radiasi standar primer (*Primary Standard Dosimetry Laboratory*, PSDL), turunannya adalah nilai standar sekunder yang dihasilkan oleh laboratorium radiasi standar sekunder (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*, SSDL), sedangkan rantai kalibrasi yang paling akhir adalah nilai pengukuran dari alat ukur radiasi yang digunakan oleh pengguna langsung di lapangan seperti survei meter[8]. Survei meter dikalibrasi terhadap nilai standar yang menjadi data referensi atau data acuan. Nilai perbandingan antara data referensi dengan data survei meter yang dikalibrasi disebut sebagai faktor kalibrasi.

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) nomor 6 tahun 2009 tentang keselamatan radiasi dalam penggunaan zat radioaktif dan pesawat sinar-X untuk peralatan gauging [9], survei meter yang digunakan dalam pemantauan proteksi radiasi harus memiliki respon energi yang sesuai dengan energi peralatan gauging yang digunakan, rentang pengukuran yang cukup dengan tingkat radiasi yang diukur, dan terkalibrasi. Dengan kata lain, survei meter seharusnya dikalibrasi sesuai dengan jenis dan energi radiasi yang digunakan. Namun kondisi saat ini survei meter dikalibrasi dengan sumber radiasi Cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) yang memiliki energi sebesar 661,64 keV.

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dilakukan penelitian tentang kalibrasi survei meter terhadap radiasi sinar-X energi rendah yang digunakan pada suatu area yang menggunakan radiasi sinar-X energi rendah.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka dapat disusun rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu bagaimana hasil kalibrasi dari berbagai jenis survei meter terhadap paparan radiasi sinar-X energi rendah berdasarkan berkas sempit (*narrow beam*) menurut ISO 4037-4 : 2004 - *X and gamma reference radiation for*



*calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy.*

### **1.3 Batasan Masalah**

Karena adanya batasan waktu dalam penelitian ini dan sekaligus untuk membuat ruang lingkup yang jelas, maka pada penelitian ini dibuat batasan masalah sebagai berikut :

1. Paparan radiasi sinar-X yang diamati adalah paparan radiasi sinar-X energi rendah berdasarkan ISO 4037-4:2004 - *X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy.*
2. Sumber radiasi sinar-X yang digunakan yaitu pesawat sinar-X dengan kualitas radiasi N-15, N-20, dan N-25.
3. Jenis survei meter yang digunakan adalah survei meter Babyline-31A, InspectorUSB, Atomtex AT1103M, Ludlum Model 15, dan RadEye B20-ER.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian tugas akhir tentang kalibrasi survei meter terhadap radiasi sinar-X energi rendah ini adalah untuk mengetahui kebergantungan energi dari berbagai jenis survei meter terhadap paparan radiasi sinar-X energi rendah.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari hasil penelitian ini yaitu sebagai informasi bagi para pekerja dalam bidang industri yang berhubungan dengan radiasi paparan sinar-X energi rendah dibawah 30 keV.

**(halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

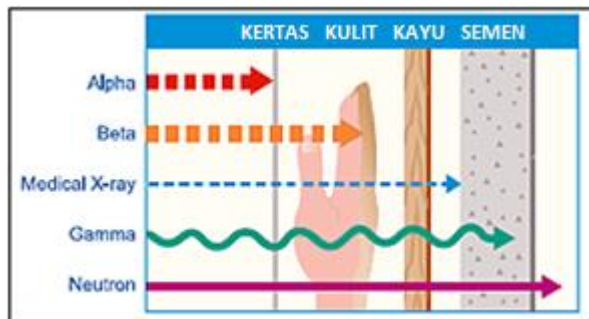
### 2.1 Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel. Keberadaan radiasi tidak dapat dilihat, tidak dapat tercium karena tidak berbau, tidak dapat didengar, tetapi hanya dapat dideteksi dengan alat detektor radiasi. Berdasarkan tingkat energi yang dimiliki, radiasi dapat dibedakan atas radiasi pengion dan non pengion [10].

#### 2.1.1 Radiasi pengion

Radiasi pengion merupakan radiasi yang memiliki energi yang cukup besar untuk memindahkan elektron dari suatu atom sehingga terjadi proses ionisasi di dalam atom suatu materi yang dikenai radiasi tersebut [11]. Ionisasi adalah proses ketika elektron menyerap energi dari luar yang cukup besar untuk bergerak keluar dari ikatan atomnya sehingga terbentuk partikel bermuatan positif dan negatif [12]. Yang termasuk radiasi pengion adalah partikel Alpha ( $\alpha$ ), partikel Beta ( $\beta$ ), sinar Gamma ( $\gamma$ ), sinar-X, dan partikel neutron [10].

Radiasi pengion dapat mengionisasi materi biologi yang dilewatinya baik secara langsung maupun tidak langsung, dan menyebabkan perubahan pada tingkat molekuler, seluler, jaringan, organ, dan sistemik tubuh [13].



Gambar 2.1 Daya tembus radiasi [14]

Radiasi pengion memiliki daya tembus terhadap materi yang berbeda-beda. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, radiasi partikel Alpha memiliki daya tembus paling kecil yang tidak mampu menembus selembar kertas. Sedangkan radiasi yang memiliki daya tembus paling besar adalah radiasi partikel neutron yang mampu menembus lapisan semen.

### 2.1.2 Radiasi non pengion

Radiasi non pengion adalah radiasi yang tidak dapat menimbulkan ionisasi. Termasuk ke dalam radiasi non pengion adalah gelombang radio, gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak, dan ultraviolet [15]. Radiasi non pengion tidak menyebabkan kerusakan mikroskopis seperti yang ditimbulkan oleh radiasi pengion. Namun beberapa jenis radiasi non pengion dapat menyebabkan terjadinya perubahan kimia atau menyebabkan panas pada materi yang dikenainya [16].

## 2.2 Besaran dan Satuan Radiasi

Yang dimaksud dengan dosis radiasi adalah jumlah radiasi yang terdapat dalam medan radiasi atau jumlah energi radiasi yang diserap atau diterima oleh materi yang dilaluinya [17]. Sama halnya dengan besaran-besaran fisika lainnya, radiasi juga mempunyai ukuran atau satuan untuk menunjukkan besarnya pancaran radiasi dari suatu sumber, atau menunjukkan banyaknya dosis radiasi yang diberikan atau diterima oleh suatu medium yang terkena radiasi.

### 2.2.1 Kerma

Kerma (*Kinetic Energy Released per unit Mass*) didefinisikan sebagai energi kinetik partikel bermuatan yang dihasilkan akibat interaksi radiasi tak bermuatan dalam suatu media penyerap. Besaran kerma dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.1) berikut ini :

$$K = \frac{dE_{trans}}{dm} \quad (2.1)$$

Dengan  $K$  adalah kerma,  $dE_{trans}$  adalah jumlah energi kinetik mula-mula (awal) dari partikel bermuatan yang dilepaskan dalam suatu bahan bermassa  $dm$ . Dalam satuan SI, besaran kerma tersebut diukur dalam satuan joule per kilogram ( $J.kg^{-1}$ ), atau gray (Gy) [18].

### 2.2.2 Paparan (*Exposure*)

Paparan didefinisikan sebagai kemampuan radiasi sinar-X atau gamma untuk menimbulkan ionisasi di udara dalam volume tertentu. Pada sistem satuan internasional (SI), satuan paparan adalah Coulomb/kilogram (C/kg) yang artinya 1C/kg adalah besar paparan yang dapat menyebabkan terbentuknya muatan listrik sebesar satu coulomb pada suatu elemen volume udara yang mempunyai massa 1 kg. Sedangkan satuan lama yang sampai saat ini lebih sering digunakan adalah Roentgen (R) dengan konversi sebagai berikut

$$1 \text{ Roentgen} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg.}$$

Disamping nilai penyinaran, terdapat pula laju penyinaran (*exposure rates*). Laju paparan adalah besar paparan per satuan waktu. Satuan laju paparan yang banyak digunakan adalah R/jam dengan turunannya seperti mR/jam atau  $\mu R/jam$  [19].

### 2.2.3 Dosis serap

Dosis serap didefinisikan sebagai jumlah energi yang diserahkan oleh radiasi atau banyaknya energi yang diserap oleh bahan per satuan massa bahan itu [2]. Satuan dosis serap dalam SI adalah Joule/kg atau sama dengan Gray (Gy). Satu Gray adalah energi rata-rata sebesar 1 joule yang diserap bahan dengan massa 1 kg.

$$1 \text{ Gray (Gy)} = 1 \text{ Joule/kg}$$

Sedangkan satuan lama yang masih banyak digunakan adalah rad. Satu rad adalah energi rata-rata sebesar 100 erg yang diserap bahan dengan massa 1 gram.

$$1 \text{ Gray (Gy)} = 100 \text{ rad}$$

Berbeda dengan paparan yang hanya berlaku untuk radiasi gamma dan sinar-X dengan medium udara, besaran dosis serap ini berlaku untuk semua jenis radiasi dan semua jenis bahan yang dikenainya. Hubungan dosis serap dengan paparan adalah :

$$D = f \times X \quad (2.2)$$

Dengan  $D$  adalah dosis serap (rad),  $X$  adalah paparan (R), dan  $f$  adalah faktor konversi dari laju paparan ke laju dosis serap (rad/R) [18].

#### 2.2.4 Dosis ekivalen

Dosis serap yang sama tetapi berasal dari jenis radiasi yang berbeda akan memberikan efek biologi yang berbeda pada sistem tubuh. Hal ini terjadi karena daya ionisasi masing-masing jenis radiasi berbeda. Semakin besar daya ionisasi, maka akan semakin tinggi tingkat kerusakan biologi yang ditimbulkannya [19]. Satuan untuk dosis ekivalen dalam SI adalah Sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

Dosis ekivalen juga dapat dinyatakan dalam satuan rem

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

Besaran yang merupakan kuantisasi radiasi untuk menimbulkan kerusakan pada jaringan atau organ dinamakan faktor bobot radiasi ( $W_r$ ). Tabel 2.1 menunjukkan nilai faktor bobot radiasi berbagai jenis radiasi. Secara matematis dosis ekivalen dituliskan sebagai berikut :

$$H = \sum(D \times W_r) \quad (2.3)$$

Dengan  $H$  adalah dosis ekivalen,  $D$  adalah dosis serap dan  $W_r$  adalah faktor bobot radiasi.

Tabel 2.1 Faktor bobot radiasi [19]

Jenis Radiasi	$W_r$ (tanpa satuan)
1. Foton, untuk semua energi	1
2. Elektron muon, semua energi	1
3. Neutron dengan energi	
a. <10 keV	5
b. 10 keV hingga 100 keV	10
c. >100 keV hingga 2 MeV	20
d. >2 MeV hingga 20 MeV	10
e. >20 MeV	5
4. Proton, selain proton recoil, dengan energi > 2 MeV	5
5. Partikel alfa, fragmen fisi, inti berat	20

Masing-masing jaringan tubuh manusia mempunyai kepekaan yang berbeda satu sama lain, oleh karenanya dosis masing-masing organ dibobot dengan faktor bobot organ ( $W_T$ ), yang menunjukkan tingkat kepekaan organ terhadap dosis radiasi. Dosis ekuivalen yang telah dibobot dengan faktor bobot organ disebut dosis ekuivalen efektif ( $H_{eff}$ ) [17].

$$H_{eff} = \sum(H \times W_T) \quad (2.4)$$

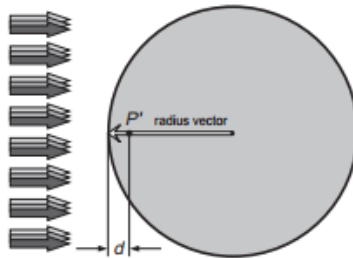
Tabel 2.2 Faktor Bobot Organ [17]

Organ	Faktor bobot Organ ( $W_T$ )
Gonad	0,25
Dada	0,15
Sumsum tulang merah	0,12
Paru-paru	0,12
Kelenjar gondok	0,03
Tulang(permukaan)	0,03
Lainnya	0,30

### 2.2.5 Dosis ekivalen ambient

Dosis ekivalen ambient atau  $H^*(d)$  pada suatu titik dalam medan radiasi merupakan dosis ekivalen yang dihasilkan pada kedalaman  $d$  dalam bola ICRU (*International Commission On Radiation Units And Measurements*). Bola ICRU merupakan bola dengan diameter 30 cm yang dibuat dari bahan ekivalen dengan jaringan tubuh manusia. Bola ICRU tersusun atas 76,2% oksigen, 11,1% karbon, 10,1% hidrogen, dan 2,6% nitrogen.

Dosis ekivalen ambient dinyatakan dalam satuan sievert (Sv). Nilai kedalaman  $d$  dosis ekivalen dinyatakan dalam satuan milimeter. Geometri radiasi pada bola ICRU untuk kasus  $H^*(d)$  ditunjukkan pada Gambar 2.2 di bawah.



Gambar 2.2 Dosis ekivalen ambient pada kedalaman  $d$  dalam bola ICRU,  $H^*(d)$  [20]

Untuk radiasi dengan daya tembus kuat, nilai kedalaman  $d$  yang digunakan adalah 10 mm. Sehingga dosis ekivalen dapat dituliskan sebagai  $H^*(10)$ . Sedangkan untuk radiasi dengan daya tembus lemah, digunakan kedalaman 0,07 mm untuk kulit dan 3 mm untuk mata [20].

## 2.3 Sinar-X

Sinar-X termasuk ke dalam jenis radiasi pengion. Seperti sinar Gamma, sinar-X merupakan radiasi elektromagnetik. Hal yang membedakan adalah sinar gamma dihasilkan dari inti atom radioaktif, sedangkan sinar-X dihasilkan dari interaksi antara elektron dan atom yang secara umum terjadi di dalam suatu mesin

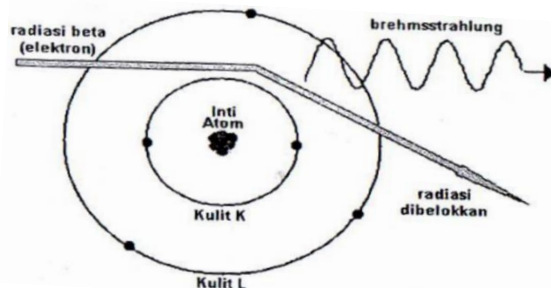


khusus. Sinar-X memiliki sifat yang hampir sama dengan cahaya tampak, sedangkan perbedaannya hanyalah sinar-X memiliki energi yang lebih besar. Radiasi sinar-X tersebut tidak dapat terdeteksi oleh alat indera manusia [21].

### 2.3.1 Proses terjadinya sinar-X

Berdasarkan proses terjadinya, sinar-X dibagi menjadi dua macam, yaitu :

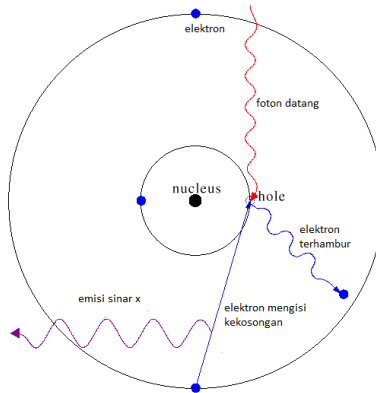
- Sinar-X *Bremsstrahlung* adalah istilah dalam bahasa Jerman yang berarti radiasi pengereman. Apabila elektron yang merupakan partikel bermuatan listrik bergerak dengan kecepatan tinggi melintas didekat inti suatu atom, maka gaya tarik elektrostatis inti atom yang kuat akan menyebabkan elektron membelok dengan tajam. Peristiwa tersebut menyebabkan elektron kehilangan energinya dengan memancarkan radiasi elektromagnetik yang dikenal sebagai sinar-X *bremsstrahlung* [1].



Gambar 2.3 Proses pembentukan sinar-X *Bremsstrahlung* [1]

- Sinar-X karakteristik, terjadi akibat adanya tumbukan elektron bebas yang memiliki energi tinggi dengan elektron orbit dari atom target. Ketika elektron dengan kecepatan tinggi menumbuk elektron pada kulit atom, akibatnya elektron pada kulit atom itu akan terpenggantikan sehingga tempat tersebut kosong. Kekosongan ini segera diisi oleh elektron dari kulit bagian atasnya disertai dengan pemancaran photon. Photon yang dihasilkan dengan cara ini disebut sinar-X karakteristik. Bila

elektron yang terpental dari kulit K maka sinar-X yang terjadi dari pengisian kulit L disebut  $K\alpha$ , dari kulit M disebut  $k\beta$  dan seterusnya [1].



Gambar 2.4 Proses pembentukan sinar-X karakteristik [22]

Sinar-X bremsstrahlung memiliki spektrum energi kontinyu yang lebar, sedangkan spektrum energi sinar-X karakteristik adalah diskrit.

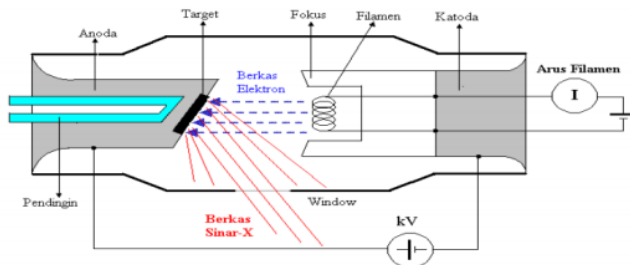
### 2.3.2 Pesawat sinar-X

Pesawat sinar-X merupakan sumber radiasi yang didesain sedemikian rupa untuk tujuan diagnostik yang terdiri dari komponen-komponen penghasil sinar-X [8]. Pesawat sinar-X terdiri dari sistem dan subsistem sinar-X atau komponen. Sistem sinar-X merupakan seperangkat komponen untuk menghasilkan radiasi dengan cara terkendali. Sedangkan subsistem merupakan kombinasi dari dua atau lebih komponen sistem sinar-X [23]. Pesawat sinar-X terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu :

- Tabung insersi sinar-X

Tabung insersi sinar-X terdiri lapisan kaca (atau keramik) yang didalamnya terdapat elektroda positif (anoda) dan elektroda negatif (katoda) dengan tingkat kehampaan udara (*vacuum*) sangat tinggi mencapai  $10^{-9}$  hPa (hectoPascal). Katoda terbuat dari nikel murni dimana celah antara 2 batang katoda disisipi kawat pijar (filamen) yang menjadi sumber elektron pada tabung sinar-X. Dengan adanya pengaruh beda

tegangan antara anoda dan katoda (tegangan tabung), elektron dari katoda akan tertarik menuju anoda dengan laju yang dipercepat. Aliran elektron tersebut diarahkan secara konvergen ke target dengan menggunakan sebuah silinder atau *Focusing Cup* agar tidak tersebar. Ketika elektron yang dipercepat tersebut bertumbukan dengan target pada anoda, sebagian dari energinya diubah menjadi radiasi sinar-X [8]. Setiap tabung sinar-X harus ditempatkan dalam wadah atau pelindung lain. Di dalam wadah juga terdapat alat pendingin seperti minyak. Wadah tabung biasanya terdiri dari timbal atau uranium susut kadar yang dilapisi logam. Celah atau lubang pada wadah tabung tidak boleh lebih besar dari yang diperlukan untuk menghasilkan berkas sinar dengan ukuran maksimum [7].



Gambar 2.5 Bagian Tabung Sinar-X [23]

- **Generator**  
Fungsi utama dari generator adalah untuk menjadikan operator dapat mengendalikan 3 (tiga) parameter kuantifikasi yaitu tegangan tabung (kV), arus tabung (mA) dan waktu paparan (s). Saat ini ada empat jenis generator pesawat sinar-X yaitu *single phase*, *three phase*, *high frequency* dan *constant potential*.
- **Kolimator**  
Kolimator berfungsi sebagai instrumen yang mengatur besarnya ukuran lapangan radiasi. Kolimator memiliki beberapa komponen yaitu lampu kolimator, plat timbal pembentuk lapangan, meteran untuk mengukur jarak dari

fokus ke detektor atau ke film, tombol untuk menghidupkan lampu kolimasi, dan filter Aluminium (Al) dan/ atau tembaga (Cu) sebagai filter tambahan [23].

➤ Instrumentasi kontrol

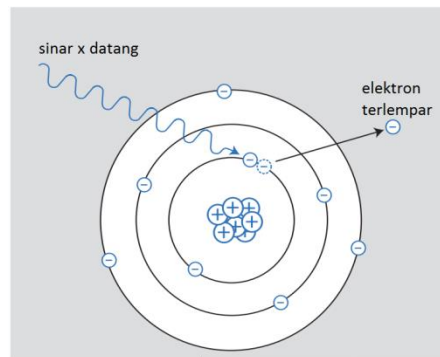
Instrumentasi kontrol berfungsi sebagai pengatur parameter pada pengoperasian pesawat sinar-X. Instrumentasi kontrol terbagi menjadi 6 modul yaitu modul *power supply* (catu daya DC), modul pengatur tegangan (kV), modul pengatur arus (mA), modul pengatur waktu pencitraan (s), modul kendali sistem, dan catu daya AC dari sumber PLN [24].

### 2.3.3 Interaksi sinar-X dengan materi

Ketika radiasi sinar-X mengenai suatu materi maka akan terjadi interaksi antara sinar-X tersebut dengan materi yang dikenainya. Mekanisme interaksi yang terjadi dapat berbeda, tergantung dari energi datang radiasi dan materi yang terkena radiasi. Interaksi tersebut antara lain :

➤ Efek fotolistrik

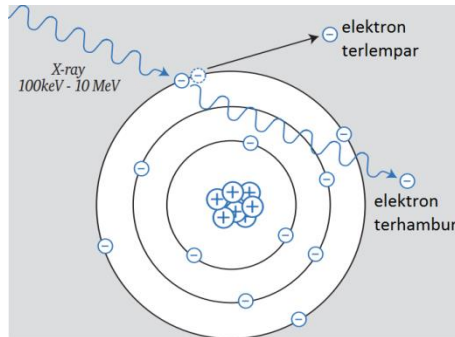
Ketika sinar-X (foton) dengan energi relatif rendah melewati suatu materi dan menumbuk atom dari materi tersebut, seluruh energi yang dimiliki foton dapat digunakan untuk melepaskan elektron yang terikat pada ikatan paling dalam dari atom, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 [25].



Gambar 2.6 Skema efek fotolistrik [25]

➤ Efek compton

Untuk sinar-X dengan energi lebih tinggi (100 keV hingga 10 MeV), interaksi antara foton dengan elektron bebas atau yang terikat lemah pada kulit atom terluar menyebabkan sebagian dari energi foton diberikan pada elektron yang kemudian elektron tersebut akan terlepas dari lintasannya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.

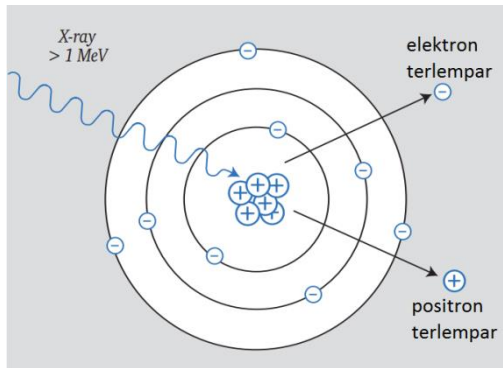


Gambar 2.7 Skema efek compton [25]

Pada saat yang sama, foton akan dibelokkan dari sudut datang awal dan muncul sebagai radiasi dengan energi yang lebih rendah hasil dari tumbukan, terhambur ke segala arah termasuk arah belakang yang dikenal sebagai hamburan balik atau *back-scatter* [24]. Sebagian energi dari foton diberikan pada elektron hingga elektron tersebut terlepas dari lintasannya, sedangkan sisanya dibawa sebagai energi radiasi sinar-X hamburan [1].

➤ Produksi pasangan (*pair production*)

Mekanisme produksi pasangan ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah. Produksi pasangan hanya dapat terjadi pada level energi yang sangat tinggi (di atas 1 MeV). Foton dengan energi tinggi dapat menembus inti atom sehingga inti atom ikut terlibat dalam interaksi tumbukan. Energi foton digunakan untuk membentuk sepasang elektron ( $e^-$ ) dan positron ( $e^+$ ). Positron adalah partikel yang identik dengan elektron tetapi bermuatan positif [25].



Gambar 2.8 Skema produksi pasangan [25]

## 2.4 Kualitas radiasi (*Radiation quality*)

Kualitas radiasi dari sinar-X bergantung pada pengaturan parameter tegangan tabung, arus, total filtrasi, dan *half-value layer* (HVL). HVL dari radiasi sinar-X merupakan ketebalan dari bahan penyerap yang dapat mengurangi nilai laju kerma udara sinar-X menjadi 50% dari nilai awalnya. Ketergantungan faktor kalibrasi terhadap koreksi, konversi, dan faktor hamburan balik dari kualitas radiasi dinyatakan dari ketergantungannya terhadap HVL dalam aluminium atau tembaga. Aluminium (Al) digunakan untuk sinar-X dengan tegangan tabung hingga 100 kV. Sedangkan tembaga (Cu) digunakan untuk tegangan tabung di atas 100 kV, namun terkadang juga terdapat tumpang-tindih yakni digunakan pada tegangan 50 kV [8].

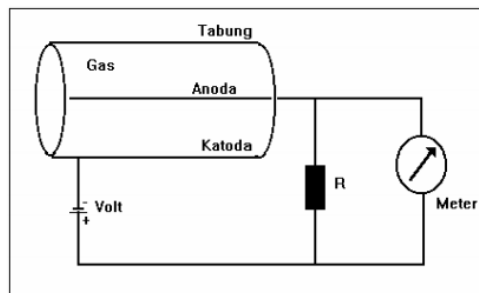
## 2.5 Jenis Detektor Radiasi

Detektor merupakan suatu bahan yang peka terhadap radiasi. Apabila radiasi pengion melintasi bahan detektor, maka antara bahan detektor dan radiasi pengion akan terjadi interaksi sehingga menimbulkan berbagai jejak atau tanggapan tertentu yang merupakan hasil interaksi antara radiasi dan bahan detektor. Besar jejak yang timbul sebanding dengan dosis radiasi yang diterimanya. Jejak tersebut dapat timbul karena dalam interaksi itu radiasi menyerahkan sebagian atau seluruh energinya kepada medium yang dilewati [26].

### 2.6.1 Detektor ionisasi gas

Detektor ini bekerja dengan memanfaatkan hasil interaksi antara radiasi pengion dengan atom atau molekul gas yang dipakai sebagai detektor. Lintasan radiasi pengion di dalam bahan dapat mengakibatkan terlepasnya elektron-elektron dari atom bahan itu sehingga terbentuklah pasangan ion positif dan negatif. Proses pembentukan pasangan ini disebut proses ionisasi. Foton dan neutron melakukan ionisasi secara tidak langsung. Proses ionisasi tidak langsung itu dimulai dari interaksi antara foton maupun neutron dengan bahan detektor sehingga dihasilkan partikel bermuatan. Partikel inilah yang selanjutnya melakukan ionisasi terhadap bahan detektor [26].

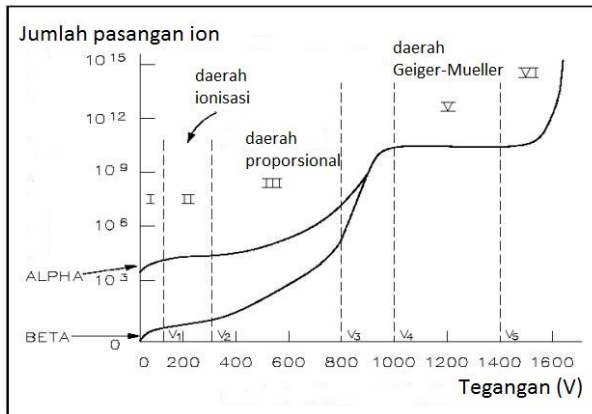
Karena bahan detektornya berupa gas maka detektor radiasi ini disebut detektor ionisasi gas. Jumlah pasangan ion yang terbentuk bergantung pada jenis dan energi radiasinya. Detektor ionisasi gas berbentuk silinder yang diisi gas dan mempunyai dua elektroda. Dinding tabung yang dipakai sebagai selubung gas dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan sehingga berfungsi sebagai elektroda negatif (katoda). Kawat di tengah-tengah tabung dihubungkan dengan kutub positif sumber tegangan sehingga berfungsi sebagai elektroda positif (anoda). Skema detektor ionisasi gas ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.9 Skema detektor ionisasi gas [27].

Karena menarik ion-ion yang muatannya berlawanan, maka akan terjadi pengurangan muatan listrik pada masing-masing elektroda. Sebagian muatan listrik pada keping elektroda dinetralkan

oleh ion-ion yang ditariknya. Penurunan jumlah muatan pada masing-masing elektroda akan mengakibatkan penurunan tegangan antara kedua elektroda itu. Perubahan tegangan itu akan mengakibatkan terjadinya aliran listrik (denyut *out put*) yang dapat diubah menjadi angka-angka hasil cacahan radiasi.



Gambar 2.10 Daerah kerja detektor ionisasi gas [27]

Berdasarkan tegangan operasinya, detektor tersebut dikembangkan menjadi tiga jenis alat pantau radiasi, yaitu :

➤ Detektor kamar ionisasi

Detektor kamar ionisasi bekerja pada tegangan paling rendah. Pasangan ion dihasilkan secara langsung oleh interaksi radiasi dengan bahan detektor. Jumlah elektron yang terkumpul di anoda sama dengan jumlah yang dihasilkan oleh proses ionisasi radiasi pengion primer. Dalam daerah kamar ionisasi ini tidak terjadi pelipat gandaan (multiplikasi) jumlah ion oleh proses ionisasi sekunder. Dalam daerah ini dimungkinkan untuk membedakan antara radiasi yang berbeda ionisasi spesifikasinya misal antara partikel- $\alpha$ , partikel- $\beta$ , atau radiasi- $\gamma$ . Aliran elektron di dalam detektor dapat menimbulkan aliran listrik yang dipakai sebagai dasar untuk pengukuran radiasi yang diterima detektor. Disain tabung dan gas pengisi yang digunakan bergantung pada maksud penggunaan alat itu. Detektor ini



dapat dipakai untuk pemantauan radiasi jenis foton maupun beta. Jika detektor dirancang untuk pemantauan radiasi- $\beta$ , maka pada tabung detektor memiliki bagian yang berdinding sangat tipis yang dikenal sebagai jendela (*window*). Melalui jendela itulah radiasi- $\beta$  dapat mencapai detektor. Sedangkan tanpa jendela, hanya radiasi foton saja yang dapat mencapai detektor, sementara radiasi- $\beta$  akan tertahan oleh dinding tabung detektor [26].

➤ Detektor proporsional

Detektor proporsional beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi dari detektor kamar ionisasi. Daerah ini ditandai dengan mulai terjadinya multiplikasi gas yang besarnya bergantung pada jumlah elektron mula-mula dan tegangan yang digunakan. Multiplikasi terjadi karena elektron-elektron yang dihasilkan oleh proses ionisasi dipercepat oleh tegangan yang digunakan sehingga elektron tersebut mempunyai energi yang cukup tinggi untuk melakukan proses ionisasi berikutnya (ionisasi sekunder) terhadap bahan detektor sebelum mencapai anoda. Meskipun terjadi multiplikasi, namun jumlah totalelektron yang dihasilkan tetap sebanding (proporsional) dengan ionisasi mula-mula. Keuntungan dari detektor ini adalah bahwa detektor ini mampu mendeteksi radiasi dengan intensitas yang cukup rendah. Detektor gas yang beroperasi ada daerah proporsional memerlukan sumber tegangan yang super stabil karena pengaruh tegangan pada daerah ini sangat besar terhadap tingkat multiplikasi gas dan juga terhadap tinggi pulsa *out put* [26].

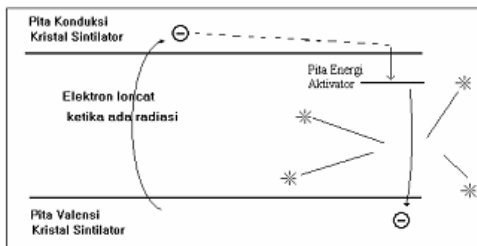
➤ Detektor *Geiger-Mueller* (GM)

Jumlah ion yang dihasilkan di daerah ini sangat banyak, mencapai nilai saturasinya, sehingga pulsanya relatif tinggi dan tidak memerlukan penguat pulsa lagi. Kerugian utama dari detektor ini ialah tidak dapat membedakan energi radiasi yang memaasukinya, karena berapapun energinya jumlah ion yang dihasilkannya sama dengan nilai saturasinya. Detektor ini merupakan detektor yang paling sering digunakan, karena

dari segi elektronik sangat sederhana dan tidak memerlukan rangkaian penguat. Sebagian besar alat ukur radiasi, yang harus bersifat portabel, terbuat dari detektor *Geiger-Mueller* [28].

## 2.6.2 Detektor sintilasi

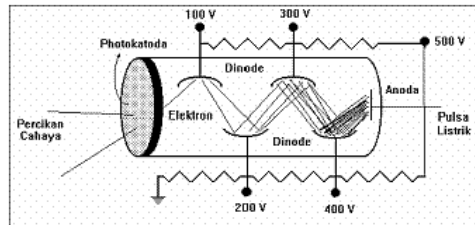
Detektor sintilasi selalu terdiri dari dua bagian yaitu bahan sintilator dan photomultiplier. Bahan sintilator merupakan suatu bahan padat, cair maupun gas yang akan menghasilkan percikan cahaya bila dikenai radiasi pengion. Photomultiplier digunakan untuk mengubah percikan cahaya yang dihasilkan bahan sintilator menjadi pulsa listrik. Di dalam kristal bahan sintilator terdapat pita valensi dan pita konduksi yang dipisahkan dengan tingkat energi tertentu. Ketika terdapat radiasi yang memasuki kristal, terdapat kemungkinan bahwa energinya akan terserap oleh beberapa elektron di pita valensi, sehingga dapat meloncat ke pita konduksi. Beberapa saat kemudian elektron-elektron tersebut akan kembali ke pita valensi melalui pita energi bahan aktivator sambil memancarkan percikan cahaya.



Gambar 2.11 Skema percikan cahaya pada kristal sintilator [28]

Bahan sintilator yang sering digunakan sebagai detektor radiasi antara lain kristal NaI(Tl), kristal ZnS(Ag), kristal LiI(Eu), dan sintilator organik. Photokatoda yang ditempelkan pada bahan sintilator, akan memancarkan elektron bila dikenai cahaya dengan panjang gelombang yang sesuai. Elektron yang dihasilkannya akan diarahkan, dengan perbedaan potensial, menuju dinode pertama. Dinode tersebut akan memancarkan beberapa elektron sekunder bila dikenai oleh elektron. Elektron-elektron sekunder yang dihasilkan dinode pertama akan menuju dinode kedua dan dilipat gandakan

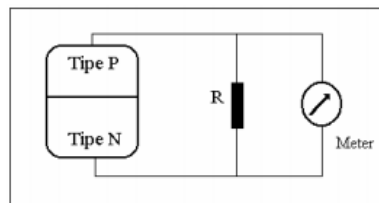
kemudian ke dinode ketiga dan seterusnya sehingga elektron yang terkumpul pada dinode terakhir berjumlah sangat banyak. Dengan sebuah kapasitor kumpulan elektron tersebut akan diubah menjadi pulsa listrik



Gambar 2.12 Proses di dalam tabung photomultiplier [28]

### 2.6.3 Detektor semikonduktor

Energi radiasi yang memasuki bahan semikonduktor akan diserap oleh bahan sehingga beberapa elektronnya dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Bila diantara kedua ujung semikonduktor tersebut terdapat beda potensial maka akan terjadi aliran arus listrik. Jadi pada detektor ini, energi radiasi diubah menjadi energi listrik. Sambungan semikonduktor dibuat dengan menyambungkan semikonduktor tipe N dengan tipe P (*PN Junction*).



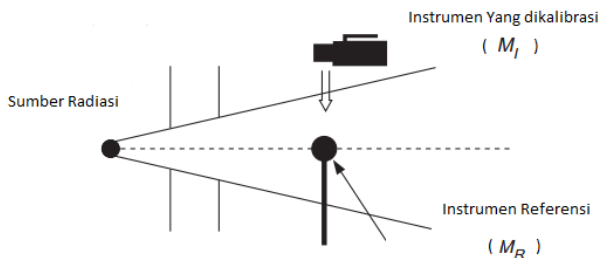
Gambar 2.13 Rangkaian listrik pada detektor semikonduktor [28]

Kutub positif dari tegangan listrik eksternal dihubungkan ke tipe N sedangkan kutub negatifnya ke tipe P seperti terlihat pada Gambar 2.13 di atas. Hal ini menyebabkan pembawa muatan positif akan tertarik ke atas (kutub negatif) dan begitu pula sebaliknya untuk muatan negatif sehingga terbentuk lapisan kosong muatan (*depletion layer*) pada sambungan PN. Dengan adanya lapisan kosong muatan ini maka tidak akan terjadi arus listrik. Bila ada radiasi pengion yang

memasuki lapisan kosong muatan ini maka akan terbentuk ion-ion baru, elektron dan *hole*, yang akan bergerak ke kutub positif dan negatif. Tambahkan elektron dan *hole* inilah yang akan menyebabkan terbentuknya pulsa atau arus listrik [28].

## 2.6 Kalibrasi Alat Ukur Radiasi

Kalibrasi didefinisikan sebagai penentuan kuantitatif dari alat ukur radiasi dengan cara membandingkan nilai pengukuran dari alat ukur tersebut dengan hasil pengukuran dari alat ukur standar yang tertelusur. Sedangkan pengujian adalah kegiatan untuk memastikan bahwa suatu alat dapat berfungsi dengan baik, serta penentuan kuantitatif terhadap karakteristik alat seperti rentang maksimum pengukuran radiasi, sistem listrik, ataupun kondisi lingkungan yang mempengaruhi kinerja alat [20].



Gambar 2.14 Skema metode kalibrasi [20]

Sudah merupakan suatu ketentuan bahwa setiap alat ukur proteksi radiasi harus dikalibrasi secara periodik oleh instansi yang berwenang. Hal ini dilakukan untuk menguji ketepatan nilai yang ditampilkan alat terhadap nilai sebenarnya. Perbedaan nilai antara nilai yang ditampilkan alat ukur dengan nilai sebenarnya harus dikoreksi dengan suatu parameter yang disebut sebagai faktor kalibrasi ( $F_k$ ). Dalam melakukan pengukuran, nilai yang ditampilkan alat ukur radiasi harus dikalikan dengan faktor kalibrasinya [26].

Terdapat berbagai metode kalibrasi yang dapat digunakan dalam melakukan kalibrasi alat ukur pengukuran radiasi. Metode kalibrasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode kalibrasi substitusi. Skema metode kalibrasi tersebut ditunjukkan pada Gambar

2.14 di atas. Alat ukur standar diletakkan pada suatu jarak tertentu dari sumber radiasi yang disebut sebagai titik acuan. Hasil pengukuran alat ukur standar ( $M_R$ ) perlu dikalikan dengan koefisien konversi ( $h$ ) terlebih dahulu untuk mengkonversikan hasil pengukuran menjadi besaran dosis ekuivalen ( $H$ ). Persamaan untuk menentukan faktor kalibrasi alat ukur standar ( $N_R$ ) dituliskan pada Persamaan (2.5) berikut [20]:

$$N_R = \frac{H}{hM_R} \quad (2.5)$$

Kemudian alat ukur yang akan dikalibrasi diletakkan pada titik referensi yang sama seperti pada alat ukur standar. Hasil pengukuran dari alat ukur yang akan dikalibrasi sudah berupa besaran dosis ekuivalen ( $M_I$ ) sehingga tidak perlu dikonversi terlebih dahulu. Persamaan untuk menentukan faktor kalibrasi alat ukur ( $N_I$ ) tersebut dituliskan pada Persamaan (2.6) berikut [20] :

$$N_I = \frac{H}{M_I} \quad (2.6)$$

Kombinasi dari Persamaan (2.5) dan (2.6) di atas cukur  $N_I$  sebagai berikut [20] :

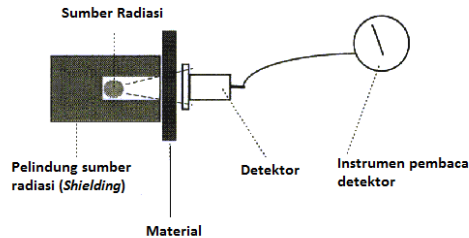
$$N_I = N_R \frac{hM_R}{M_I} \quad (2.7)$$

## 2.7 Aplikasi Teknik Nuklir di Bidang Industri

Dalam bidang industri diperlukan sistem kontrol terhadap berbagai besaran seperti tebal, kepadatan, laju aliran, dan komposisi material yang diproses. Salah satu jenis sistem kontrol yang memanfaatkan aplikasi teknik nuklir adalah gauging. Gauging adalah sistem peralatan (terdiri atas sumber radiasi dan detektor radiasi) yang memanfaatkan sifat-sifat unik radiasi pengion untuk pengontrolan proses dan kualitas produk.

Berdasarkan prinsip kerjanya, teknik gauging dapat dibedakan menjadi tiga :

➤ Transmisi



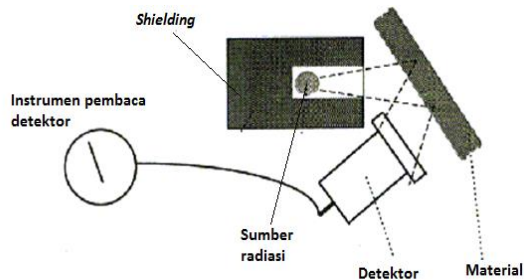
Gambar 2.15 Prinsip kerja gauging transmisi [29]

Tabel 2.3 Jenis aplikasi gauging transmisi [5]

Sumber Radiasi	Jenis Aplikasi
Sinar-X	Ketebalan baja sampai 20 mm, level cairan dalam kaleng
Am-241 (gamma)	Ketebalan baja sampai 10 mm, isi botol
Cs-137 (gamma)	Ketebalan baja sampai 100 mm, isi pipa/tangki
Co-60 (gamma)	Isi tungku pembuat arang, isi tempat pembakaran batu bara
Pm-241 (beta)	Densitas kertas
Tl-204 (beta)	Ketebalan kertas, karet dan tekstil
Kr-85 (beta)	Ketebalan <i>Cardboard</i>
Sr/Y-90 (beta)	Ketebalan logam tipis, ketebalan tembakau dalam rokok

Sumber radiasi yang digunakan dalam teknik gauging transmisi adalah sumber radiasi beta dan foton. Prinsip kerja teknik tersebut adalah pengukuran intensitas keluaran dari suatu sumber radiasi yang ditransmisikan melalui sampel. Intensitas radiasi yang diserap sampel menyatakan ketebalan atau densitas sampel tersebut [5].

➤ Hamburan balik (back scatter)



Gambar 2.16 Skema gauging hamburan balik [29]

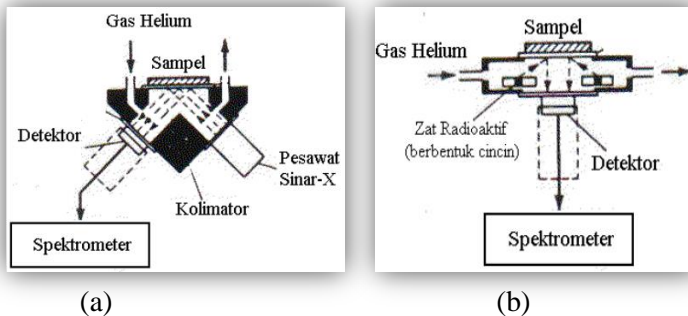
Tabel 2.4 Jenis aplikasi gauging hamburan balik [5]

Sumber Radiasi	Jenis Aplikasi
Am-241/Be	Deteksi hidrokarbon dalam batuan
Pm-241 (beta)	Ketebalan kertas, lapisan logam tipis
Tl-204 (beta)	Ketebalan karet tipis dan tekstil
Sr/Y-90 (beta)	Ketebalan karet, plastik, dan alloy ringan yang tipis
Am-241(	Densitas kertas
Tl-204 (beta)	Ketebalan kertas, karet dan tekstil
Kr-85 (beta)	Ketebalan <i>Cardboard</i>
Sr/Y-90 (beta)	Ketebalan logam tipis, ketebalan tembakau dalam rokok

Prinsip kerja dari teknik gauging hamburan balik adalah detektor dan sumber radiasi berada pada sisi yang sama terhadap sampel. Sumber radiasi diletakkan di depan jendela detektor. Berkas radiasi yang dihambur-balikkan oleh sampel akan diukur intensitasnya oleh detektor. Nilai yang terbaca pada detektor menyatakan ketebalan dan/atau nomor atom sampel tersebut [29].

➤ Reaksi induksi (kelompok analisa)

Penggunaan teknik analisis dengan sistem nuklir di bidang industri dimaksudkan untuk menganalisis komposisi material baik secara kualitatif maupun kuantitatif, dengan presisi tinggi dan tidak merusak (*non destructive analysis*). Beberapa jenis teknis analisis yang dapat digunakan antara lain adalah sinar-X fluoresensi (XRF) dan sinar-X difraksi (XRD). XRF merupakan teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk menganalisis unsur kimia suatu material. Sebuah sampel yang akan dianalisis strukturnya diiradiasi dengan sumber radiasi sinar-X. Radiasi tersebut menyebabkan elemen dalam sampel mengemisikan perpendaran foton (fluorensi) dengan energi karakteristik.

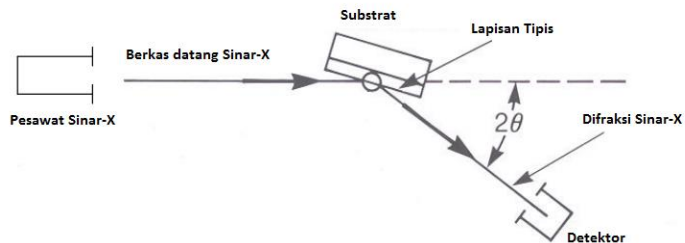


Gambar 2.17 Skema teknik analisis XRF. (a) dengan sumber radiasi pesawat sinar-X; (b) dengan sumber radiasi zat radioaktif [12]

Sebuah sistem detektor yang prinsip kerjanya membagi sinar-X yang dipancarkan berdasarkan panjang gelombangnya digunakan untuk mengukur puncak-puncak spektrum sinar-X yang dihasilkan sehingga diketahui jenis elemen serta jumlah elemen yang terkandung di dalam sampel. Jenis sumber radiasi yang sering digunakan adalah Fe-55, Pu-238, Pm-147, Am-241, Cd-109, Gd-153, Co-57, H-3 (aktivitas zat radioaktif antara 200 MBq-40GBq), dan



pesawat sinar-X. Bidang atom dari sebuah kristal menyebabkan berkas sinar-X yang datang mengalami interferensi satu sama lain ketika mereka meninggalkan kristal. Fenomena tersebut dinamakan sinar-X difraksi. Sinar-X difraksi banyak dimanfaatkan untuk mengukur ketebalan dari suatu lapisan tipis, mengetahui susunan atomik, serta mengetahui struktur kristal seperti, parameter kisi, tegangan, ukuran bulir (*grain*), dan ekspansi termal.



Gambar 2.18 Skema teknik analisis XRD [30]

## 2.8 Bahaya Radiasi Sinar-X

Radioaktif yang meluruh secara spontan menghasilkan radiasi pengion yang memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari atom (menimbulkan adanya partikel bermuatan) atau memutus beberapa ikatan kimia. Jaringan hidup pada tubuh manusia dapat rusak oleh adanya radiasi pengion. Tubuh akan berusaha untuk memperbaiki kerusakan yang terjadi, namun terkadang kerusakan yang terjadi sangatlah parah atau tersebar luas, atau kesalahan terjadi pada proses perbaikan secara alami tersebut.

Secara umum, yang mempengaruhi efek kesehatan yang diakibatkan oleh paparan radiasi sinar-X adalah jumlah dan lamanya waktu paparan terhadap radiasi tersebut. Efek kesehatan yang dapat ditimbulkan dapat dibedakan menjadi dua yakni efek stokastik dan efek non-stokastik. Efek stokastik berhubungan dengan efek jangka panjang, level rendah (*chronic*) terkena paparan radiasi. Peningkatan level paparan membuat efek kesehatan tersebut memiliki kemungkinan yang tinggi untuk dapat terjadi, namun tidak

mempengaruhi jenis atau tingkat keparahan dari efek yang ditimbulkan.

Efek utama yang sering disebutkan sebagai efek radiasi adalah kanker. Kanker merupakan sel yang tumbuh dengan tidak terkontrol. Secara alami, tubuh memiliki sistem yang mengatur kecepatan pertumbuhan sel dan penggantian dengan sendirinya. Tubuh juga memiliki kendali terhadap proses untuk memperbaiki atau menggantikan jaringan yang rusak. Kerusakan yang terjadi pada level seluler atau molekuler dapat mengganggu proses kendali yang menyebabkan adanya sel dengan pertumbuhan tak terkontrol (sel kanker). Itulah alasan mengapa kemampuan radiasi pengion untuk memutus ikatan kimia dalam atom dan molekul membuatnya berpotensi sebagai karsinogenik (pemicu kanker).

Efek stokastik lain yang dapat muncul adalah adanya perubahan pada DNA (mutasi DNA). Mutasi ini dapat dibedakan menjadi teratogenik dan genetik. Mutasi teratogenik hanya berdampak pada individu yang terkena paparan radiasi. Mutasi genetik menyebabkan adanya mutasi DNA tidak hanya pada individu yang terkena paparan radiasi melainkan juga pada anak turunnya karena telah merubah susunan genetik yang ada.

Efek non-stokastik timbul dalam kondisi paparan radiasi level tinggi, dan menjadi lebih parah seiring dengan kenaikan paparan. Efek non stokastik sering dikaitkan pula dengan efek jangka pendek (*acute*). Tidak seperti kanker, efek yang timbul akibat paparan radiasi tingkat tinggi (*acute exposure*) kebanyakan akan muncul dengan segera setelah terkena paparan radiasi. Yang termasuk ke dalamnya adalah efek terbakar dan *radiation sickness*. *Radiation sickness* juga banyak disebut sebagai efek keracunan radiasi. Hal ini dapat menyebabkan penuaan dini atau bahkan kematian. Jika dosis radiasi sangatlah melebihi ambang batas dosis, kematian biasanya dapat terjadi pada korban paparan radiasi dalam waktu dua bulan. Gejala dari *radiation sickness* dapat berupa mual, lemas, rambut rontok, kulit terbakar atau terjadi kegagalan fungsi organ [27].

Hampir seluruh ujung saraf berada dekat dengan permukaan kulit, sehingga akan ada indikasi langsung oleh saraf ketika kulit mengenai objek bertemperatur tinggi. Sebaliknya, sinar-X mampu menembus lapisan terluar dari kulit sehingga efek terbakar tidak akan terasa sampai terjadi luka pada kulit. Pada beberapa kasus, efek

terbakar dari sinar-X yang parah mengakibatkan gangren (kondisi serius yang muncul ketika banyak jaringan tubuh yang mati) dan bahkan amputasi jari.

Dosis *acute* sekitar 500 rem pada bagian tubuh menyebabkan efek terbakar. Pada awalnya tidak terdapat rasa sakit setelah terkena paparan radiasi, namun sehari setelah terkena paparan biasanya mulai timbul efek panas atau gatal. Kemudian akan diikuti dengan timbulnya efek kemerahan atau radang pada area kulit yang terkena paparan dan menghilang beberapa hari setelahnya. Dosis *acute* sekitar 600-900 rem pada lensa mata menyebabkan mulai terbentuknya katarak pada mata [31].



Gambar 2.19 Efek kulit kemerahan (*reddening*) [31]



Gambar 2.20 Efek terbakar pada jari [31]

Untuk efek dosis *acute* >1000 rem pada bagian tubuh akan menyebabkan kerusakan jaringan yang serius. Diawali dengan efek kemerahan dan radang, kemudian diikuti dengan adanya pembengkakan. Dosis *acute* diatas itu menyebabkan kerusakan parah pada jaringan seperti pengelupasan kulit yang hampir sama dengan efek terbakar oleh cairan panas atau terbakar cairan kimia [31].



Gambar 2.21 Efek pengelupasan kulit [31]

## 2.9 Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi adalah tindakan yang dilakukan untuk mengurangi pengaruh radiasi yang merusak akibat paparan radiasi [9]. Prinsip proteksi radiasi berdasarkan *Basic Safety Standard* (BSS) [32] terdiri atas 3 unsur yaitu :

### ➤ Justifikasi

Justifikasi adalah semua kegiatan yang melibatkan paparan radiasi hanya dilakukan jika menghasilkan nilai lebih atau memberikan manfaat yang nyata (azaz manfaat). Justifikasi dari suatu rencana kegiatan atau operasi yang melibatkan paparan radiasi dapat ditentukan dengan mempertimbangkan keuntungan dan kerugian dengan menggunakan analisa untung-rugi untuk menyatakan bahwa akan terdapat keuntungan lebih dari dilakukannya kegiatan tersebut [33].

### ➤ Optimasi

Pada optimasi semua paparan harus diusahakan serendah yang layak dipakai (*As Low As Reasonably Achievable-ALARA*) dengan memperhitungkan faktor ekonomi dan sosial syarat ini menyatakan bahwa kerugian/kerusakan dari suatu kegiatan yang melibatkan radiasi harus ditekan serendah mungkin dengan menerapkan suatu peraturan proteksi. Dalam pelaksanaannya, syarat ini dapat dipenuhi dengan pemilihan kriteria desain atau penentuan nilai batas/tingkat acuan bagi tindakan yang akan dilakukan [33].

➤ **Pembatasan**

Pada pembatasan semua dosis ekuivalen yang diterima oleh seseorang tidak boleh melampaui Nilai Batas Dosis (NBD) yang telah ditetapkan. Pembatasan dosis ini dimaksud untuk menjamin bahwa tidak ada seorang pun terkena risiko radiasi baik efek stokastik maupun efek deterministik akibat dari penggunaan radiasi maupun zat radioaktif dalam keadaan normal [33]. NBD untuk pekerja radiasi dan masyarakat ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Nilai Batas Dosis [33]

<b>Penerapan</b>	<b>Pekerja Radiasi</b>		<b>Masyarakat</b>
	<b>Tahunan</b>	<b>Triwulan</b>	<b>Tahunan</b>
Dosis Efektif	20 mSv <sup>*)</sup>	5 mSv	1,0 mSv
Lensa Mata	20 mSv	35 mSv	15 mSv
Jaringan/ organ lain	500 mSv	125 mSv	50 mSv
Dosis wanita hamil selama kehamilan	1 mSv	-	-

<sup>\*)</sup>dosis efektif maksimal setahun sebesar 50 mSv dengan total 5 tahun sebesar 100 mSv

Upaya yang dapat dilakukan agar Nilai Batas Dosis tidak terlampaui berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir [8] adalah :

- Menyelenggarakan pemantauan paparan radiasi dengan survei meter;
- Menyelenggarakan pemantauan dosis yang diterima personil dengan film *badge* atau TLD *badge*, dan dosimeter saku yang terkalibrasi; dan
- Menyediakan perlengkapan proteksi radiasi.

Bahaya radiasi eksternal dapat dikurangi dengan memperkecil semua tingkat radiasi eksternal yang dapat dilaksanakan dengan cara berikut [11]:

- Menggunakan sumber radiasi sesuai kebutuhan
- Menjaga jarak sejauh yang dapat dimungkinkan dari sumber radiasi
- Pengaturan waktu kerja
- Menggunakan perisai radiasi yang sesuai
- Melaksanakan pemantauan daerah kerja secara rutin dan memasang tanda bahaya radiasi yang sesuai

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 19 Januari sampai dengan 26 Juni 2015 di ruang penyinaran sinar-X Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) Kantor Pusat BATAN Jakarta Selatan.

#### **3.2 Alat dan Bahan Penelitian**

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

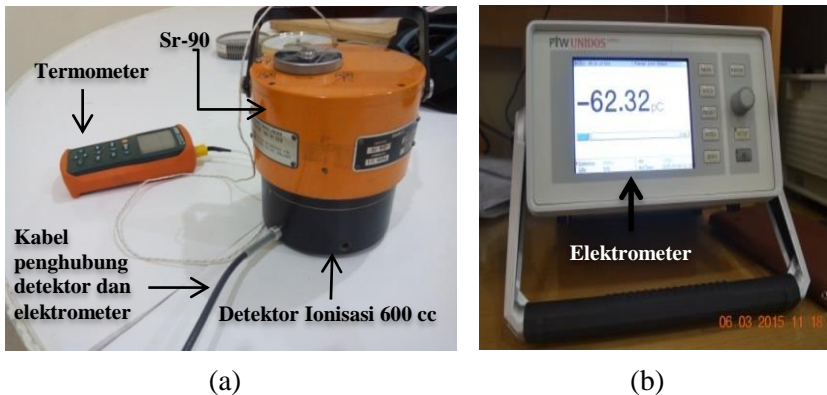
- Detektor Ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc
- Elektrometer PTW Unidos Webline
- Survei meter Atomtex AT1103M
- Survei meter Babyline 31A
- Survei meter Ludlum M-15
- Survei meter RadEye B20-ER
- Survei meter InspectorUSB
- Filter pesawat sinar-X dalam mm Al
- Barometer
- Termometer
- Hygrometer
- *Waterpass*
- Meja kalibrasi
- Dudukan Survei meter
- Kamera CCTV
- Laptop
- Monitor TV
- Kabel penghubung
- Laser
- Kontrol panel dan pesawat sinar-X YXLON MGC 41

Gambar untuk masing-masing peralatan dan bahan yang digunakan ditunjukkan pada Lampiran 1.

### 3.3 Tahap Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan empat tahapan utama yaitu, pengecekan kestabilan sistem dosimeter, pengukuran laju kerma udara standar sumber radiasi yang digunakan, kalibrasi survei meter, dan pengolahan data. Tahapan penelitian dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 di bawah.

#### 3.3.1 Pengecekan kestabilan sistem dosimeter



Gambar 3.1 Pengecekan stabilitas sistem dosimeter dengan sumber Sr-90. (a) Ruang penyinaran; (b) Ruang kontrol

Sebelum dilakukan pengukuran laju kerma udara standar, terlebih dahulu dilakukan pengecekan terhadap sistem dosimeter yang digunakan yang terdiri atas detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc dan elektrometer PTW Unidos Webline. Detektor yang berada di dalam ruang penyinaran dihubungkan dengan elektrometer yang diletakkan di ruang kontrol kemudian elektrometer dihubungkan ke sumber tegangan. Tegangan pada elektrometer diatur sebesar -250 volt. Barometer, higrometer, dan termometer diletakkan di dalam ruang penyinaran. Detektor diletakkan di bawah sumber pengecek dan termometer dimasukkan ke dalam sumber pengecek Strontium-90 (Sr-90). Setelah itu



dilakukan penyinaran detektor dengan sumber pengecek Strontium-90 (Sr-90).

Penyinaran sumber standar Sr-90 terhadap detektor dilakukan selama 250 detik. Bacaan hasil paparan sumber Sr-90 ditampilkan pada elektrometer PTW Unidos Webline dalam satuan muatan listrik nano Coulomb (nC) dengan pengambilan data sebanyak 5 kali untuk mengetahui kondisi kestabilan dari sistem dosimeter yang digunakan. Bacaan muatan yang diperoleh dibandingkan dengan bacaan muatan standar. Apabila deviasi antara bacaan standar dan bacaan saat dilakukan pengecekan kestabilan dibawah  $\pm 1 \%$  maka alat ukur dinyatakan stabil dan dapat digunakan untuk pengukuran.

### **3.3.2 Pengecekan nilai kualitas radiasi sumber sinar-X energi rendah**

Untuk mengecek besarnya nilai kualitas radiasi sumber sinar-X energi rendah digunakan filter sesuai dengan data pengukuran HVL standar dan filter tambahan untuk masing-masing energi yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 di bawah. Pesawat sinar-X dipanaskan sesuai dengan buku manual pesawat. Detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc diletakkan pada jarak 100 cm dari pusat detektor terhadap pusat sumber radiasi sinar-x dan detektor dihubungkan dengan elektrometer PTW Unidos Webline. Kemudian detektor dan elektrometer dipanaskan selama 30 menit dan nilai tegangan tabung, arus, FoC serta waktu penyinaran yang terletak pada kontrol panel pesawat sinar-x diatur.

Filter tambahan ditempatkan di belakang kolimator sesuai dengan energi sinar-X yang digunakan. Detektor disinari dengan sinar-X menggunakan filter tambahan selama 5 menit untuk pemanasan kemudian detektor disinari kembali selama 1 menit. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali. Setelah itu diletakkan filter HVL dengan ketebalan tertentu untuk masing-masing energi di antara filter tambahan dan detektor kemudian dilakukan penyinaran kembali terhadap detektor dengan pengambilan data sebanyak 5 kali. Selanjutnya nilai keluaran sinar-X tanpa menggunakan filter HVL dibandingkan dengan nilai keluaran sinar-X dengan menggunakan filter HVL. Nilai keluaran dari pesawat sinar-X akan terserap setengahnya oleh filter HVL sehingga terbaca pada detektor sebesar

50% dari nilai awalnya tanpa filter HVL dengan toleransi sebesar  $\pm 1\%$ . Dengan cara yang sama pengecekan HVL dilakukan untuk sinar-x energi rendah yang lain.

Tabel 3.1 Karakteristik kualitas radiasi sinar-X energi rendah

<b>Tegangan Tabung (kV)</b>	<b>Energi efektif (keV)</b>	<b>HVL (mmAl)</b>	<b>Filter Tambahan (mmAl)</b>
15	12,6	0,14	0,39
20	16,3	0,32	0,75
25	20,7	0,66	1,81

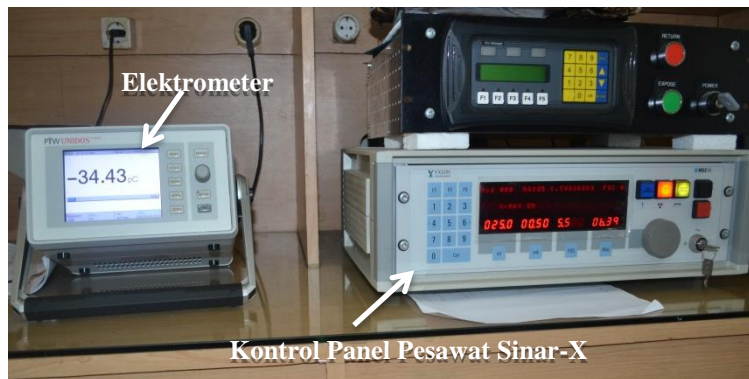
### 3.3.3 Pengukuran laju kerma udara standar pesawat sinar-X

Pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber radiasi yang berasal dari pesawat sinar-X dilakukan untuk variasi tegangan tabung sebesar 15 kV, 20 kV, dan 25 kV. Hasil pengukuran laju kerma udara standar sumber yang didapatkan kemudian dikonversikan menjadi besaran laju dosis ekuivalen ambien  $\dot{H}^*(10)$  standar yang dijadikan data acuan terhadap hasil laju dosis yang didapatkan survei meter untuk mendapatkan faktor kalibrasi survei meter terhadap masing-masing energi sinar-X yang digunakan.

Pengukuran laju kerma udara standar sinar-X dilakukan dengan pengaturan ulang nilai tegangan tabung, arus, FoC serta waktu penyinaran pada kontrol panel sesuai dengan energi sinar-X yang digunakan. Detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc diletakkan pada jarak 100 cm dari pusat detektor terhadap sumber radiasi sinar-X dan detektor dihubungkan dengan elektrometer PTW Unidos Webline. Filter tambahan diletakkan dibelakang kolimator untuk energi sinar-x yang akan diukur. Detektor disinari dengan sinar-X terlebih dahulu selama 15 menit guna proses penyesuaian antara paparan sumber radiasi dengan detektor dan elektrometer. Kemudian dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali untuk masing-masing penyinaran selama 1 menit. Pengambilan data laju kerma udara standar juga disertai dengan pembacaan cacah latar belakang dari tempat penyinaran dan pembacaan nilai temperatur, tekanan serta kelembaban ruang sebagai faktor koreksi dari pengukuran.



(a)



(b)

Gambar 3.2 Skema pengukuran laju kerma udara standar pesawat sinar-X. (a) Ruang penyinaran sinar-X; (b) Ruang kontrol

Dengan menggunakan cara yang sama pengukuran laju kerma udara standar dilakukan untuk sinar-X energi rendah yang lain dan variasi jarak. Pengukuran pertama dengan variasi jarak 100cm, 200cm, 300cm, 400cm, 500cm, 600cm, dan 700cm bertujuan untuk mengetahui linearitas dari hasil pengukuran detektor. Sedangkan pengukuran kedua dengan variasi jarak yang digunakan dalam kalibrasi survei meter yaitu 100 cm, 200 cm, 400 cm, dan 700 cm. Posisi detektor ionisasi, filter tambahan, sumber radiasi pesawat

sinar-X, kontrol panel pesawat sinar-X, dan elektrometer PTW Unidos Weblin diletakkan seperti pada gambar 3.2. Elektrometer dan kontrol panel pesawat sinar-X diletakkan di ruang kontrol yang terpisah dari ruang penyinaran sinar-X.

### 3.3.4 Kalibrasi survei meter

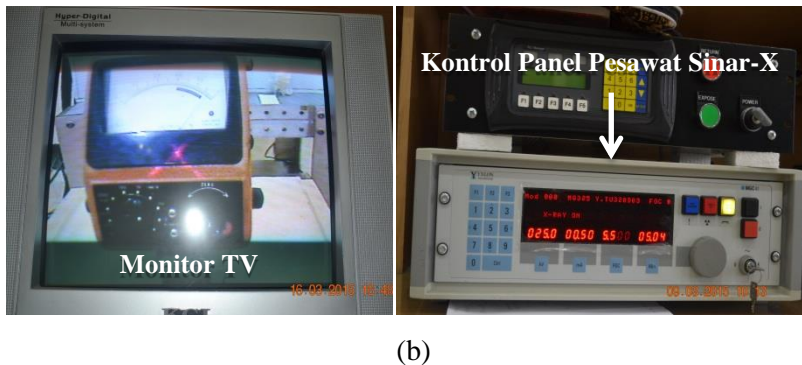
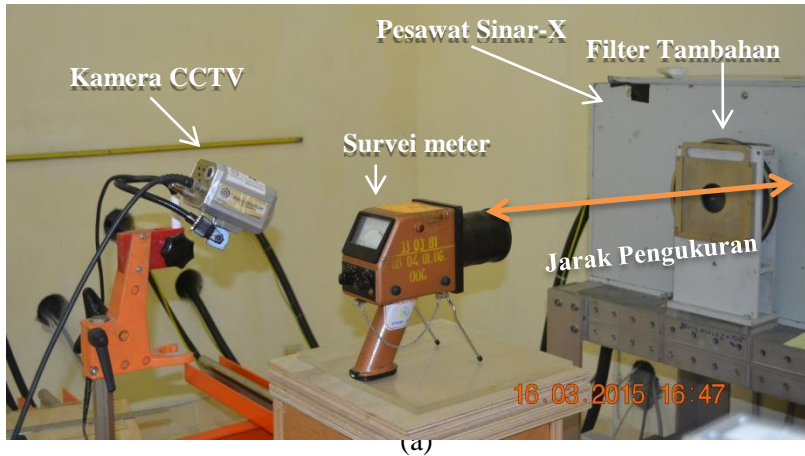
Kalibrasi survei meter dengan sumber radiasi dari pesawat sinar-X dilakukan untuk variasi tegangan tabung sebesar 15 kV, 20 kV, dan 25 kV. Posisi survei meter dan sumber radiasi sinar-X diletakkan seperti pada Gambar 3.5. Posisi detektor dari survei meter dan posisi sumber radiasi sinar-X dipastikan berada dalam satu garis lurus dan tegak lurus dengan menggunakan bantuan *laser* dan *waterpass*. Penempatan jarak survei meter terhadap sumber radiasi berbeda-beda tergantung pada kemampuan masing-masing survei meter.

Tabel 3.2 Karakteristik survei meter

Survei meter	Model	Detektor	Deteksi Radiasi	Rentang Pengukuran
Babyline[34]	31A	Kamar pengion	$\beta$ , $\gamma$ , sinar-X	10 $\mu$ Gy/h – 1000 mGy/h
Atomtex[35]	AT1103M	Sintilasi NaI(Tl)	$\gamma$ , sinar-X	50 nSv/h – 100 $\mu$ Sv/h
RadEye[36]	B20-ER	GM-pancake	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ , sinar-X	0 – 100 mSv/h
Ludlum[37]	15	GM jendela akhir	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$	0 – 2000 $\mu$ Sv/h
Inspector[38]	USB	GM-tabung jendela tipis	$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ , sinar-X	0,01- 1000 $\mu$ Sv/h

Masing-masing survei meter mempunyai rentang pengukuran yang berbeda yang dijelaskan pada buku operasionalnya. Berdasarkan laju kerma udara standar dan laju dosis ekivalen ambien standar yang didapatkan, maka jarak survei meter terhadap sumber

radiasi dapat diatur perkiraan hasil bacaan tidak lebih dari 80% skala maksimum suatu survei meter. Hal ini bertujuan untuk mengurangi kemungkinan pengukuran diluar batas kemampuan survei meter (*over range*) yang dapat mempengaruhi kinerja survei meter bahkan dapat merusak survei meter jika sering terjadi. Karakteristik survei meter yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Gambar 3.3 Skema kalibrasi survei meter. (a) Ruang penyinaran sinar-X; (b) Ruang kontrol

Sebelum digunakan untuk kalibrasi survei meter terlebih dahulu dilakukan pemanasan terhadap pesawat sinar-X sesuai dengan buku manual pesawat. Filter tambahan dipasang sesuai dengan energi yang akan digunakan. Setelah itu nilai tegangan tabung, arus, FoC serta waktu penyinaran pada kontrol panel diatur dan kamera CCTV dihubungkan dengan monitor TV untuk dapat melihat hasil bacaan survei meter. Kontrol panel dan monitor TV diletakkan di ruang terpisah dari ruang penyinaran sinar-X yakni pada ruang kontrol.

Kalibrasi survei meter dilakukan dengan menyinari detektor dari survei meter dan pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali sesuai dengan bacaan survei meter yang ditampilkan pada monitor TV. Pengambilan data kalibrasi survei meter juga disertai dengan pembacaan cacah latar belakang dari tempat penyinaran dan pembacaan nilai temperatur, tekanan serta kelembaban ruang sebagai faktor koreksi dari pengukuran.

### 3.3.5 Perhitungan data laju kerma udara standar

Hasil pengukuran detektor ditampilkan pada elektrometer dalam bentuk cacahan muatan listrik nano Coulomb tiap satu menit (nC/menit). Hasil tersebut dapat dikonversi menjadi besaran laju kerma udara (Gy/h) dengan menggunakan Persamaan (3.1).

$$\dot{K}_u = \left[ M \times Nk \times \frac{P_o}{P} \times \frac{(T + 273.15)}{(T_o + 273.15)} \right] \times t \quad (3.1)$$

Keterangan :

$\dot{K}_u$  : Laju kerma udara ( $\mu\text{Gy}/\text{jam}$ )

$M$  : Hasil pengukuran (nC/menit)

$Nk$  : Faktor kalibrasi detektor ( $\mu\text{Gy}/\text{nC}$ )

$P_o$  : Tekanan udara standar (1013 mbar)

$P$  : Tekanan udara pada pengukuran (mbar)

$T_o$  : Suhu standar ( $+20^0\text{C}$ )

$T$  : Suhu pada pengukuran ( $^0\text{C}$ )

$t$  : konversi menit menjadi satuan jam (60 menit)

Tabel 3.3 Faktor kalibrasi detektor ionisasi tipe NE 2575 volume 600cc

<b>Tegangan tabung (kV)</b>	<b>Energi efektif (keV)</b>	<b>Faktor kalibrasi detektor Nk (<math>\mu\text{Gy/nC}</math>)</b>
15	12,6	$47,2 \pm 0,9\%$
20	16,3	$46,2 \pm 0,9\%$
25	20,7	$45,2 \pm 0,9\%$

Setelah didapatkan nilai untuk besaran laju kerma standar, besaran tersebut dapat dikonversi menjadi besaran laju dosis ekuivalen ambien standar  $\dot{H}^*(10)$  dengan menggunakan Persamaan (3.2).

$$\dot{H}^*(10) = \dot{K}_u \times F_{konversi} \quad (3.2)$$

Keterangan :

$\dot{H}^*(10)$  : Laju dosis ekuivalen ambien ( $\mu\text{Sv/jam}$ )

$\dot{K}_u$  : Kerma udara ( $\mu\text{Gy/jam}$ )

$F_{konversi}$  : Faktor konversi  $\dot{H}^*(10)/\dot{K}_u$  ( $\mu\text{Sv}/\mu\text{Gy}$ )

Tabel 3.4 Faktor konversi [39]

<b>Tegangan tabung (kV)</b>	<b>Energi efektif (keV)</b>	<b>Faktor konversi <math>\dot{H}^*(10)/\dot{K}_u</math> (Sv/Gy)</b>
15	12,6	0,102
20	16,3	0,323
25	20,7	0,576

### 3.3.6 Perhitungan faktor kalibrasi survei meter

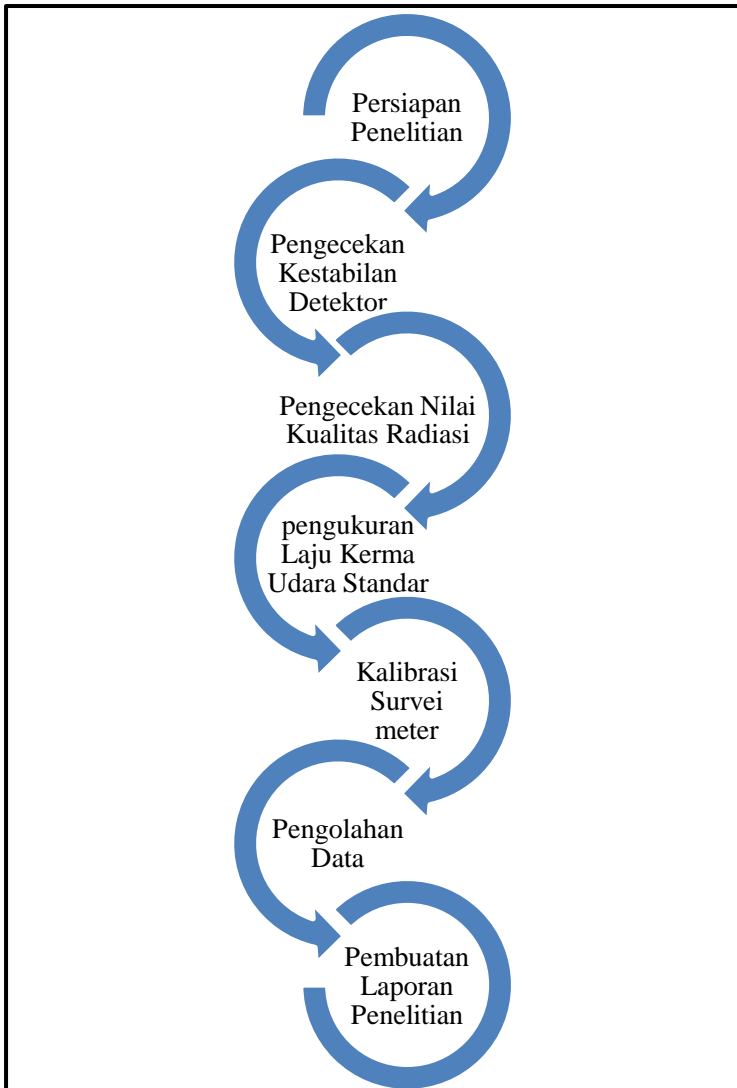
Faktor kalibrasi survei meter ( $F_k$ ) dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.3) atau (3.4) tergantung dari besaran hasil bacaan masing-masing survei meter. Jika hasil bacaan survei meter berupa besaran laju kerma udara ( $\dot{K}_u$ ) maka persamaan yang digunakan adalah Persamaan (3.3), dan jika besaran survei meter

berupa laju dosis ekivalen ambien ( $\dot{H}^*(10)$ ) maka persamaan yang digunakan adalah Persamaan (3.4).

$$Fk = \frac{K_u \text{ standar}}{K_u \text{ survei meter}} \quad (3.3)$$

$$Fk = \frac{\dot{H}^*(10) \text{ standar}}{\dot{H}^*(10) \text{ survei meter}} \quad (3.4)$$





Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

**(halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengecekan Stabilitas Sistem Dosimeter

Sumber pengecek : Strontium-90 (Sr-90)

Waktu paroh,  $T_{1/2}$  : 10482,68 Hari

Bacaan standar,  $B_{st}$  : 1,559 nC/250 detik ( tanggal 03-01-2013)

Waktu peluruhan dari waktu standar :

Standar = 03-01-2013

Pengecekan kestabilan = 10-04-2015

Selang waktu peluruhan,  $t$  = 827 hari

Bacaan standar Sr-90 hasil peluruhan hingga tanggal pengecekan kestabilan :

$$B_a = B_{st} \times e^{-(0,693/T_{1/2}) \cdot t} = 1,476 \text{ nC/250 detik}$$

Deviasi antara bacaan standar  $B_a$  terhadap bacaan pengukuran saat pengecekan kestabilan  $B_c$  :

$$\%dev = [(B_a - B_c)/B_a] \times 100\%$$

Hasil pengecekan stabilitas sistem dosimeter yang digunakan yakni detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc dan elektrometer PTW Unidos Weblin diberikan pada Tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1 Hasil pengecekan kestabilan sistem dosimeter

Bacaan Pengukuran (nC/250 detik)	Bacaan Standar (nC/250 detik)	Deviasi (%)
1,465	1,476	0,755
1,466	1,476	0,687
1,465	1,476	0,755
1,465	1,476	0,755
1,465	1,476	0,755
Deviasi rata-rata		0,742

Dari hasil pengecekan stabilitas sistem dosimeter didapatkan nilai deviasi antara bacaan alat ukur standar sumber Sr-90 dengan bacaan pengukuran yang dilakukan untuk sumber Sr-90 adalah kurang dari 1%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem dosimeter yang digunakan berada dalam kondisi stabil dan dapat digunakan dalam penelitian karena syarat untuk mengetahui sistem dosimeter dalam keadaan stabil adalah apabila nilai deviasi antara bacaan standar dan bacaan pengukuran kurang dari atau sama dengan 1% .

Apabila nilai deviasi antara bacaan alat ukur standar dengan bacaan pengukuran yang dilakukan untuk sumber Sr-90 lebih dari 1% maka sistem dosimeter berada dalam keadaan yang tidak stabil. Jika didapatkan hasil sistem dosimeter tidak stabil maka hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh ketidakstabilan dari detektor, elektrometer atau bahkan keduanya. Terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan jika didapatkan hasil sistem dosimeter tidak stabil, yakni pemanasan elektrometer, pengecekan detektor dengan elektrometer yang berbeda untuk mengetahui penyebab dari ketidakstabilan berasal dari detektor atau elektrometer yang digunakan serta pengecekan kelembapan elektrometer. Jika elektrometer lembab maka elektrometer perlu dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 40<sup>0</sup> C minimal selama 4 jam. Silica gel didalam elektrometer dicek untuk mengetahui apakah silica gel perlu diganti atau tidak. Setelah itu kabel konektor yang digunakan dikeringkan untuk menghindari kelembapan.

## 4.2 Hasil pengecekan nilai kualitas radiasi

Hasil pengecekan nilai kualitas radiasi diberikan pada Tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.2 Pengecekan nilai kualitas radiasi

Tegangan Tabung (kV)	Hasil Pengukuran (nC/menit)		Perbandingan (%)
	Filter Tambahan	Filter Tambahan + HVL	
15	3,910	1,932	49,407
20	5,441	2,681	49,274
25	3,210	1,589	49,579

Dari hasil pengecekan nilai kualitas radiasi didapatkan nilai perbandingan bacaan dari radiasi sinar-X untuk energi rendah antara pengukuran dengan dan tanpa menggunakan filter HVL memenuhi syarat, yakni nilai  $50\% \pm 1\%$ . Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai ketebalan filter HVL dan filter tambahan sesuai data standar pada Tabel 3.1 dapat digunakan dalam penelitian. Jika dengan nilai ketebalan filter HVL dan filter tambahan sesuai data standar pada Tabel 3.1 perbandingan nilai bacaan dengan dan tanpa filter HVL berada di luar rentang  $50\% \pm 1\%$  maka nilai filter tambahan perlu diatur ulang dengan menambahkan atau mengurangi nilai ketebalan dari filter tambahan sehingga didapatkan nilai bacaan dengan dan tanpa filter HVL adalah  $50\% \pm 1\%$ .

### 4.3 Hasil Pengukuran Laju Kerma Udara Standar

Pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber radiasi pesawat sinar-X dilakukan dengan dua kali pengulangan pengukuran. Hasil pengukuran laju kerma udara standar dengan sumber radiasi pesawat sinar-X untuk masing-masing tegangan tabung diberikan pada Tabel 4.3, Tabel 4.4 dan Tabel 4.5. Data laju kerma udara standar yang disertai dengan ralat ditampilkan pada Lampiran 5.

Tabel 4.3 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 15 kV

Jarak (cm)	M (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
Pengukuran pertama			
100	3,910	11071,732	1129,317
200	0,597	1691,887	172,572
300	0,182	514,106	52,439
400	0,072	203,058	20,712
500	0,032	90,140	9,194
600	0,015	43,823	4,470
700	0,008	22,820	2,328
Pengukuran kedua			
100	3,539	10022,788	1022,324
200	0,587	1661,834	169,507
400	0,071	199,751	20,375
700	0,009	24,268	2,475

Tabel 4.4 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 20 kV

Jarak (cm)	M (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
Pengukuran pertama			
100	5,465	15149,867	4893,407
200	1,027	2846,595	919,450
300	0,376	1041,435	336,383
400	0,176	486,610	157,175
500	0,093	258,284	83,426
600	0,054	150,999	48,773
700	0,033	91,757	29,638
Pengukuran kedua			
100	5,126	14209,816	4589,771
200	1,032	2860,901	924,071
400	0,176	487,073	157,324
700	0,034	93,148	30,087

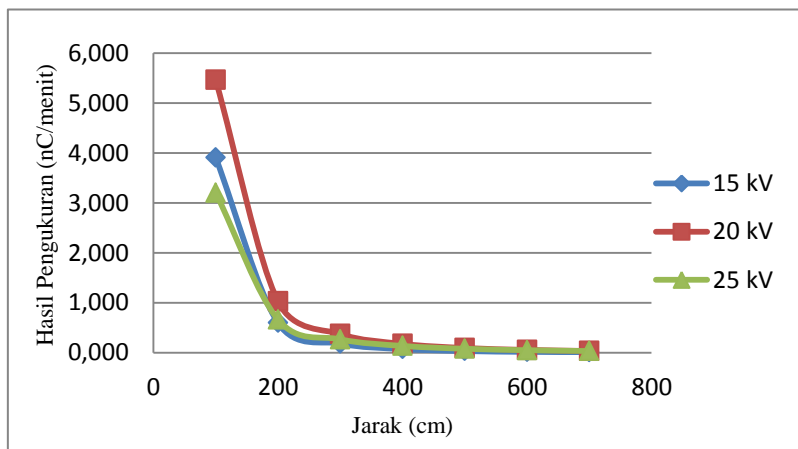
Tabel 4.5 Laju kerma udara standar sinar-X tegangan tabung 25 kV

Jarak (cm)	M (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
Pengukuran pertama			
100	3,205	8691,472	5006,288
200	0,664	1799,480	1036,500
300	0,267	724,608	417,374
400	0,135	365,326	210,428
500	0,078	210,880	121,467
600	0,049	131,955	76,006
700	0,032	87,356	50,317
Pengukuran kedua			
100	3,040	8243,597	4748,312
200	0,675	1830,501	1054,368
400	0,137	371,083	213,744
700	0,033	88,865	51,186

Pengukuran dilakukan dengan dua kali pengulangan untuk memastikan kebenaran hasil pengukuran laju kerma udara standar radiasi sinar-X. Pengukuran pertama dilakukan dengan menggunakan 7 variasi jarak pengukuran untuk mengetahui linearitas hasil pengukuran detektor. Pengukuran kedua dilakukan dengan menggunakan 4 variasi jarak yakni jarak yang digunakan dalam kalibrasi survei meter.

Karakteristik linearitas dari pengukuran detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc untuk tegangan tabung 15 kV, 20 kV, dan 25 kV diberikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1. Secara teori, laju dosis berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pengukuran yang dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.1). Sehingga dengan semakin jauh jarak pengukuran terhadap sumber radiasi, maka nilai laju dosis yang terbaca juga akan semakin menurun secara kuadrat terbalik.

$$\frac{dosis_1}{dosis_2} = \frac{jarak_2^2}{jarak_1^2} \quad (4.1)$$



Gambar 4.1 Karakteristik pengukuran dengan detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc

Terbukti dalam hasil uji linearitas yang dilakukan dengan menggunakan 7 variasi jarak bahwa semakin jauh jarak yang digunakan dalam pengukuran, maka semakin kecil nilai laju dosis yang terbaca. Pola kurva karakteristik linearitas dari pengukuran

detektor ionisasi tipe NE 2575 C volume 600 cc untuk tegangan tabung 15 kV, 20 kV, dan 25 kV memiliki pola yang hampir sama dengan pola penurunan nilai laju dosis terhadap kudrat jarak. Perbandingan antara kurva linearitas dengan kurva penurunan laju dosis per-kuadrat jarak ditampilkan pada Lampiran 7. Hal ini menunjukkan bahwa laju dosis radiasi sinar-X berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber radiasi. Sehingga dalam bekerja dengan menggunakan radiasi sinar-X sangat penting untuk memperhitungkan jarak terhadap sumber radiasi untuk meminimalisir dosis yang diterima.

Kebenaran hasil pengukuran dipastikan dengan melakukan perhitungan perbedaan antara hasil pengukuran pertama dengan hasil pengukuran kedua. Toleransi perbedaan hasil diantara kedua pengukuran tersebut adalah  $\pm 5\%$ . Jika hasil pengukuran yang didapatkan dari kedua pengukuran memiliki perbedaan di atas nilai toleransi tersebut maka pengukuran masih belum dapat dikatakan benar dan perlu dilakukan pengulangan untuk mengetahui kepastian hasil pengukuran yang benar. Perbedaan hasil yang didapatkan untuk keempat jarak yang digunakan dalam kalibrasi survei meter antara pengukuran pertama dan pengukuran kedua memiliki rentang nilai yang masuk dalam batas toleransi yakni sebesar  $\pm 5\%$ . Deviasi antara pengukuran pertama dan kedua ditampilkan pada Lampiran 6. Hasil pengukuran laju kerma udara standar yang digunakan dalam kalibrasi survei meter adalah hasil pengukuran kedua.



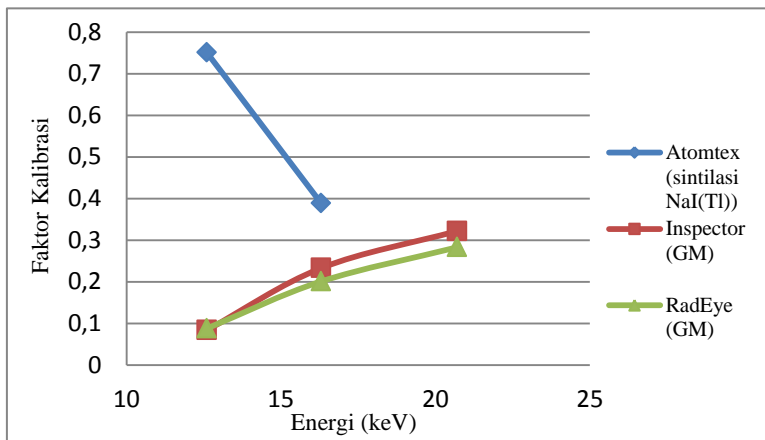
#### 4.4 Hasil Kalibrasi Survei meter

Faktor kalibrasi yang didapatkan untuk masing-masing survei diberikan pada Tabel 4.6 berikut :

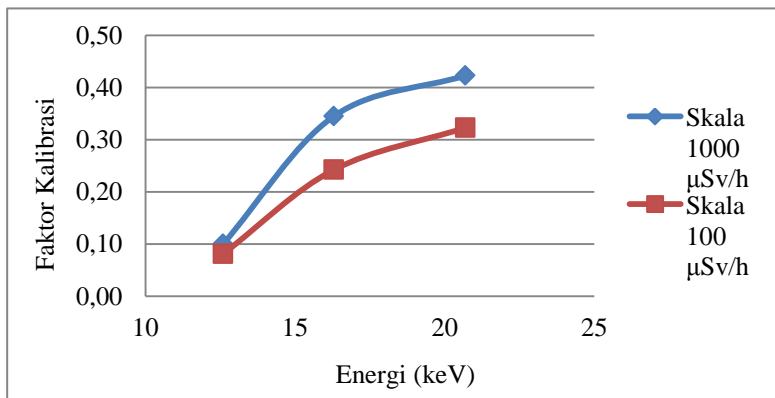
Tabel 4.6 Faktor kalibrasi survei meter

Survei meter	Energi (keV)	Skala	Faktor Kalibrasi	Ralat Relatif (%)
Babyline-31A	12,6	x1 rad/h	1,026	0,90
		x100 mrad/h	0,897	1,08
		x10 mrad/h	1,092	1,14
	16,3	x1 rad/h	0,941	0,90
		x100 mrad/h	0,837	0,94
		x10 mrad/h	0,937	0,90
	20,7	x1 rad/h	0,885	1,32
		x100 mrad/h	0,740	0,90
		x10 mrad/h	0,899	0,94
Atomtex AT1103M	12,6	-	0,751	1,22
	16,3	-	0,389	0,92
	20,7	-	-	-
Inspector USB	12,6	-	0,084	0,91
	16,3	-	0,233	0,91
	20,7	-	0,322	0,91
RadEye B20-ER	12,6	-	0,088	0,92
	16,3	-	0,201	0,90
	20,7	-	0,283	0,91
Ludlum M-15	12,6	x1000 $\mu$ Sv/h	0,10	0,90
		x100 $\mu$ Sv/h	0,08	1,00
	16,3	x1000 $\mu$ Sv/h	0,35	0,90
		x100 $\mu$ Sv/h	0,24	1,16
	20,7	x1000 $\mu$ Sv/h	0,42	0,90
		x100 $\mu$ Sv/h	0,32	1,04

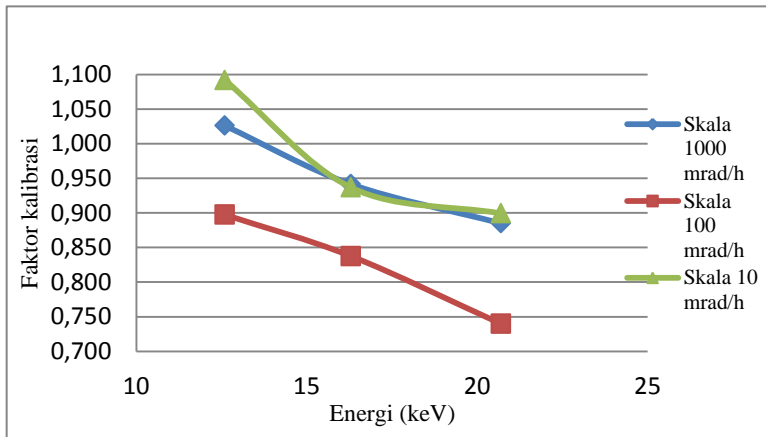
Data faktor kalibrasi untuk masing-masing survei meter yang ditampilkan pada Tabel 4.6 dapat dinyatakan dalam tampilan visual sebagai kurva kalibrasi. Kurva kalibrasi untuk beberapa survei meter tanpa skala ditampilkan dalam satu gambar yakni pada Gambar 4.2. Sedangkan untuk survei meter dengan skala, kalibrasi dilakukan untuk tiap satuan skala sehingga tampilan kurva diberikan pada gambar terpisah untuk masing-masing survei meter seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.2 Kurva kalibrasi survei meter atomtex, Inspector dan RadEye



Gambar 4.3 Kurva kalibrasi survei meter ludlum M-15 (GM)



Gambar 4.4 Kurva kalibrasi survei meter Babyline-31A (kamar pengion)

Survei meter dengan detektor yang sama menunjukkan pola kurva kalibrasi yang saling menyerupai. Hal tersebut ditunjukkan oleh survei meter Inspector USB, RadEye B20-ER, dan Ludlum M-15 yang memiliki detektor *Geiger-Mueller* (GM). Survei meter dengan detektor GM menunjukkan hasil faktor kalibrasi yang berbeda jika dikalibrasi dengan energi sinar-X yang berbeda berkisar antara 0,084 hingga 0,10 untuk energi 12,6 keV, berkisar antara 0,201 hingga 0,35 untuk energi 16,3 keV, dan 0,283 hingga 0,322 untuk energi 20,7 keV. Kecenderungan pola faktor kalibrasi yang ditunjukkan oleh survei meter dengan detektor GM adalah terjadinya kenaikan nilai faktor kalibrasi seiring dengan meningkatnya energi radiasi yang digunakan dalam kalibrasi. Nilai faktor kalibrasi yang didapatkan untuk survei meter dengan detektor GM merupakan nilai faktor kalibrasi terkecil dibandingkan dengan nilai faktor kalibrasi untuk survei meter dengan jenis yang lain. Hal tersebut menunjukkan bahwa detektor GM memiliki ketergantungan terhadap energi yang cukup tinggi.

Detektor GM merupakan detektor yang masuk ke dalam jenis detektor ionisasi gas dengan daerah kerja yang menggunakan tegangan paling tinggi. Jumlah ion yang dihasilkan pada daerah kerja detektor GM sangat banyak hingga mencapai nilai saturasinya karena tegangan yang digunakan sangat tinggi. Dengan banyaknya ion yang

dihasilkan menjadikan detektor GM sangat sensitif terhadap radiasi bahkan untuk energi radiasi yang sangat rendah. Namun kelemahan dari detektor GM adalah tidak dapat membedakan jenis dan energi radiasi yang memasuki detektor. Karena detektor GM sangat sensitif terhadap semua jenis dan energi radiasi yang memasukinya, terdapat kemungkinan bahwa pada saat pengukuran menggunakan detektor GM tidak hanya radiasi sinar-X yang terdeteksi oleh detektor namun radiasi lain di sekitar tempat pengukuran juga ikut terdeteksi oleh detektor. Hal inilah yang menyebabkan faktor kalibrasi dari detektor GM sangat kecil, karena bacaan detektor GM jauh lebih besar dibanding dengan hasil bacaan standar.

Survei meter Atomtex AT1103M dengan detektor sintilasi NaI(Tl) menunjukkan nilai faktor kalibrasi yang berbeda pula untuk energi radiasi sinar-X yang berbeda. Faktor kalibrasi untuk energi radiasi sinar-X 12,6 keV adalah 0,751, dan untuk sinar-X energi 16,3 keV adalah 0,389. Untuk energi 20,7 keV tidak didapatkan faktor kalibrasi untuk survei meter tersebut dikarenakan pada jarak terjauh kalibrasi yakni 700 cm, hasil bacaan untuk energi tersebut masih berada di luar batas kemampuan yang dimiliki survei meter (*over range*). Sehingga pola kurva kalibrasi untuk survei meter Atomtex AT1103M dengan detektor sintilasi NaI(Tl) hanya dapat ditampilkan untuk kalibrasi dengan sumber radiasi sinar-X pada energi 12,6 keV dan 16,3 keV. Didapatkan nilai faktor kalibrasi yang berbanding terbalik dengan nilai faktor kalibrasi yang didapatkan untuk survei meter dengan detektor GM, yakni memiliki kecenderungan mengalami penurunan nilai faktor kalibrasi seiring dengan semakin besarnya energi radiasi sinar-X yang digunakan. Hal tersebut menunjukkan bahwa detektor sintilasi NaI(Tl) memiliki ketergantungan pula terhadap energi radiasi yang digunakan dalam kalibrasi seperti detektor GM.

Detektor sintilasi NaI(Tl) mempunyai efisiensi yang cukup baik untuk pemantauan radiasi- $\gamma$ . Secara teori, radiasi- $\gamma$  dan sinar-X termasuk ke dalam jenis foton dimana perbedaannya hanya terletak pada rentang energi masing-masing jenis radiasi. Sehingga jika detektor sintilasi NaI(Tl) baik untuk pemantauan radiasi- $\gamma$ , maka detektor tersebut juga baik untuk pemantauan radiasi sinar-X. Namun hasil yang di dapatkan untuk detektor tersebut dalam penelitian ini menunjukkan hasil yang kurang efisien karena masih

memiliki ketergantungan terhadap energi yang cukup tinggi. Hal ini dapat disebabkan karena jarak pengukuran yang digunakan dalam kalibrasi detektor sintilasi NaI(Tl) terhadap sumber radiasi cukup jauh yakni hingga jarak 700 cm. Karena jarak yang terlalu jauh ini, terdapat kemungkinan bahwa detektor tidak dapat mendeteksi seluruh paparan radiasi akibat adanya hamburan radiasi.

Survei meter Babyline-31A dengan detektor kamar pengion menunjukkan nilai faktor kalibrasi yang cenderung mendekati untuk nilai energi radiasi yang berbeda dengan nilai faktor kalibrasi paling besar dibanding dengan faktor kalibrasi detektor GM dan sintilasi NaI(Tl). Dari kurva kalibrasi untuk detektor tersebut didapatkan pola yang menyerupai satu sama lain untuk 3 skala yang digunakan. Namun untuk skala 100 mrad/h didapatkan nilai yang sedikit berbeda dibanding dua skala lainnya. Terdapat kemungkinan bahwa pada skala tersebut potensiometer di dalam survei meter tidak berfungsi secara baik. Nilai faktor kalibrasi yang didapatkan untuk detektor kamar pengion sangat baik yakni mendekati nilai ideal faktor kalibrasi yaitu 1. Nilai faktor kalibrasi untuk masing-masing energi radiasi pada tiap skala menunjukkan nilai yang mendekati satu sama lain, hal ini menunjukkan bahwa detektor kamar pengion memiliki ketergantungan terhadap energi radiasi paling rendah dibandingkan kedua jenis detektor lainnya.

Detektor kamar pengion merupakan detektor yang masuk ke dalam jenis detektor ionisasi gas dengan daerah kerja yang menggunakan tegangan paling rendah. Pada detektor tersebut tidak terjadi pelipat gandaan (multiplikasi) jumlah ion, sehingga jumlah ion yang dihasilkan sangat sedikit. Keunggulan detektor tersebut adalah detektor tersebut mampu membedakan jenis dan energi radiasi yang memasuki detektor. Hal inilah yang menyebabkan hasil pengukuran radiasi dengan menggunakan detektor kamar pengion menjadi lebih efisien dan baik dengan hasil faktor kalibrasi mendekati 1.

Hasil penelitian yang menunjukkan bahwa survei meter dengan detektor GM memiliki ketergantungan terhadap energi yang tinggi sedangkan detektor kamar pengion memiliki ketergantungan terhadap energi yang paling rendah juga didapatkan pada penelitian yang dilakukan oleh Oliveira dan Linda [40]. Pada penelitian tersebut survei meter dikalibrasi terhadap sinar-x dengan rentang

energi antara 16 hingga 48 keV. Didapatkan bahwa respon survei meter bergantung terhadap energi radiasi yang digunakan dalam kalibrasi. Respon survei meter merupakan perbandingan nilai bacaan survei meter terhadap nilai standar. Sedangkan faktor kalibrasi ( $F_k$ ) survei meter merupakan perbandingan nilai standar terhadap nilai bacaan survei meter. Dengan kata lain respon merupakan  $1/F_k$ . Dengan adanya kebergantungan survei meter terhadap energi, maka survei meter perlu dikalibrasi dengan energi yang sesuai dengan energi radiasi yang digunakan dalam lapangan kerja radiasi supaya estimasi dosis radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi dapat dihitung dengan tepat.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa survei meter yang diuji memiliki kebergantungan terhadap energi. Survei meter dengan jenis detektor Geiger-Mueller(GM) dan sintilasi NaI(Tl) memiliki kebergantungan terhadap energi yang cukup tinggi. Nilai faktor kalibrasi ( $F_k$ ) detektor GM memiliki pola adanya kenaikan nilai  $F_k$  seiring dengan semakin besarnya energi radiasi. Sedangkan pola nilai faktor kalibrasi untuk detektor sintilasi NaI(Tl) cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambah besarnya energi radiasi. Survei meter dengan detektor kamar pengion memiliki kebergantungan energi yang paling rendah dibanding detektor lainnya. Nilai  $F_k$  yang didapatkan untuk detektor kamar pengion adalah yang paling mendekati nilai  $F_k$  ideal yakni 1.

Karena masing-masing survei meter yang diuji menunjukkan adanya kebergantungan terhadap energi, maka dalam melakukan kalibrasi survei meter harus dikalibrasi sesuai dengan energi radiasi yang digunakan oleh pengguna di lapangan kerja. Dengan faktor kalibrasi yang didapatkan untuk sinar-X energi rendah, maka survei meter yang dikalibrasi dengan sinar-X pada energi yang sesuai dengan penelitian tersebut dapat langsung dikalibrasi dengan cara mengalikan hasil pengukuran survei meter yang dikalibrasi dengan faktor kalibrasi yang telah didapatkan.

#### **5.2 Saran**

Saran dari penulis dalam pemilihan survei meter untuk pemantauan radiasi lingkungan sinar-X sebaiknya digunakan survei meter dengan detektor kamar pengion karena memiliki kebergantungan terhadap energi yang paling rendah. Dan saran untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan penelitian tentang kebergantungan survei meter terhadap fungsi sudut, dan penelitian tentang survei meter sinar-X dengan detektor lain seperti detektor semikonduktor dan proporsional.

**(halaman ini sengaja dikosongkan)**



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle>, tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [2] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), 2012, Introduction to Radiation, Minister of Public Works and Government Services Canada, Canada.
- [3] Supriyanto, A., 2005, Pengukuran Radioaktivitas dan Radiasi Gamma Lingkungan di Provinsi Lampung, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, Lampung.
- [4] Arezki, B., 2014, X-Ray Fluorescence : Energy-Dispersive Analysis, Advanced Physics Laboratory, <http://www.physik.unisiegen.de>, tanggal akses : 20 Januari 2015.
- [5] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://ansn.bapeten.go.id/files>, tanggal akses : 20 Januari 2015.
- [6] International Organization for Standardization, 2004, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy, ISO 4037-4:2004.
- [7] BATAN, 2010, <http://www.batan.go.id/pusdiklat/daftar/modules>, tanggal akses : 23 Januari 2015.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997, Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams, Second Ed., Technical Reports Series No. 277, IAEA, Vienna.
- [9] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2009, Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Zat Radioaktif dan Pesawat Sinar-X Untuk Peralatan Gauging, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2009, Jakarta.
- [10] Tanpa nama, Tanpa tahun, <http://gtcceis.anl.gov/guide/rad/index.cfm>, tanggal akses : 20 Februari 2015.

- [11] Tanpa nama, Tanpa Tahun,  
<http://www.ndhealth.gov/aq/rad/factsheet1.pdf>, tanggal akses :  
3 Maret 2015.
- [12] Tanpa nama, Tanpa Tahun,  
[http://www.epa.gov/radiation/understand/ionize\\_nonionize.html](http://www.epa.gov/radiation/understand/ionize_nonionize.html), tanggal akses : 20 Februari 2015.
- [13] Alatas, Z., dkk, Buku Pintar Nuklir,  
<http://www.batan.go.id/kip/>, tanggal akses : 20 Februari 2015.
- [14] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/radiation-basics.html>, tanggal akses : 20 februari 2015.
- [15] Tanpa nama, Tanpa Tahun,  
<http://ikk354.weblog.esaunggul.ac.id/wp-content/uploads/sites/310>, tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [16] American Registry of Radiologic Technologists (ARRT), 2015, Understanding Ionizing Radiation and Protection, 1st Edition, XRC LLC, Las Vegas.
- [17] Tanpa nama, Tanpa Tahun,  
<http://elisa.ugm.ac.id/user/archive/download/50216>, tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [18] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2014,  
<http://badiklat.bapeten.go.id>, tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [19] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://ansn.bapeten.go.id/files/23-2.pdf>, tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2000, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, Safety Reports Series No. 16, IAEA, Vienna.
- [21] Hargreaves, T., dan R. Moridi, 2010, X-Ray Safety Awareness Handbook, Second Ed., Canadian Air Transportation Security Authority, Canada.
- [22] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://ie.lbl.gov/xray/xrf.htm>, tanggal akses : 18 Februari 2015.

- [23] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2013, [http://www.bapeten.go.id/badiklat/file\\_materi/modul](http://www.bapeten.go.id/badiklat/file_materi/modul), tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [24] Fauziyah, A., 2013, Pengaruh Radiasi Sinar – X terhadap Motilitas Sperma pada Tikus Mencit (*Mus Muculus*), Skripsi S1 Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- [25] Raad, J. A., dan A. Kuiper, 2007, Industrial Radiography Image Forming Techniques, General Electric Company, GEIT-30158 (01/07), Netherlands.
- [26] Akhadi, M., 2001, Dasar – Dasar Proteksi Radiasi, Rineka Cipta, Jakarta.
- [27] Tanpa nama, Tanpa Tahun, [http://www.batan.go.id/pusdiklat/elearning/Pengukuran\\_Radiasi](http://www.batan.go.id/pusdiklat/elearning/Pengukuran_Radiasi), tanggal akses : 22 Januari 2015.
- [28] Tanpa nama, Tanpa Tahun, [http://batan.go.id/pusdiklat/elearning/Pengukuran\\_Radiasi](http://batan.go.id/pusdiklat/elearning/Pengukuran_Radiasi), tanggal akses : 18 Februari 2015.
- [29] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2015, [http://www.bapeten.go.id/badiklat/file\\_materi/tayangan](http://www.bapeten.go.id/badiklat/file_materi/tayangan), tanggal akses : 15 Maret 2015.
- [30] Tanpa nama, Tanpa Tahun, <http://www.msrt.ir/fa/shaa/Documents/WikiShaa/XRD.pdf>, tanggal akses : 22 Maret 2015.
- [31] Widner, D., Health Physicist – Training Radiation Safety Office, <https://esd.uga.edu/sites/default/files>, tanggal akses : 3 maret 2015.
- [32] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, 1996, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna.
- [33] BATAN, 2011, Pedoman Keselamatan dan Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong, Revisi 1, Komisi Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong, PUSPITEK Serpong.

- [34] Babyline 31A, 2008, Portable Gamma and X-Ray Dosimeters, Canberra Industries, Inc.
- [35] Atomtex, Manual X-Rays Radiation Dosimeter AT1003M, Republic of Belarus.
- [36] RadEye, Handheld Detection for Any Scenario, Thermo Scientific, USA.
- [37] Ludlum Model 15, 2014, Neutron Counter with Detector Models 44-7 and 42-14H, Ludlum Measurement, Inc, USA.
- [38] Inspector, Operation Manuals, S.E. International, Inc, USA.
- [39] Ankerhold, U., 2000, Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data – ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra - , PTB-Bericht, PTB-Dos-34, Braunschweig.
- [40] Oliveira, E. C., dan Linda V. E. C., Tanpa Tahun, Monitoring Survey Instruments Behaviour In Standard Low Energy X-Rays, Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, Sao paulo-Brazil.
- [41] Djonoputro, B. D., 1984, Teori Ketidakpastian Menggunakan Satuan SI, Terbitan kedua, Penerbit ITB, Bandung.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Gambar Alat dan Bahan



Gambar L1.1 Detektor ionisasi  
2575 volume 600 cc



Gambar L1.2 Elektrometer  
PTW Unidos Webline



Gambar L1.3 Survei meter  
Babyline 31-A



Gambar L1.4 Survei meter  
Ludlum M-15



Gambar L1.3 Survei meter  
Inspector-USB



Gambar L1.4 Survei meter  
Atomtex AT1103M



Gambar L1.1 Survei meter  
RadEye B20-ER



Gambar L1.2 Filter Pesawat  
Sinar-X dalam mm Al



Gambar L1.1 Waterpass



Gambar L1.2 Laser



Gambar L1.1 Hygrometer



Gambar L1.2 Termometer



Gambar L1.1 Barometer



Gambar L1.2 Kabel Penghubung



Gambar L1.1 Kamera CCTV



Gambar L1.2 Monitor TV



Gambar L1.2 Laptop



Gambar L1.2 Meja Kalibrasi dan Dudukan Survei meter



Gambar L1.2 Kontrol Panel



Gambar L1.2 Pesawat Sinar-X  
YXLON MGC 41



## Lampiran 2. Skema Pengukuran Kalibrasi Survei meter



Gambar L2.1 Kalibrasi Survei meter Inspector-USB



Gambar L2.2 Kalibrasi Survei meter Atomtex  
AT1103M



Gambar L2.1 Kalibrasi Survei meter Ludlum M-15



Gambar L2.1 Kalibrasi Survei meter babyline 31-A



Gambar L2.1 Kalibrasi Survei meter RadEye B20-ER

### Lampiran 3. Rumus Ketidakpastian

#### A. Ketidakpastian Pengukuran Berulang [41]

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\Delta x = s_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n-1}}$$

##### Keterangan :

$\bar{x}$  = Hasil Pengukuran

$x$  = Rataan Hasil Pengukuran

$\Delta x$  = Ketidakpastian (Ralat) Mutlak x akibat pengukuran berulang

#### B. Ketidakpastian Pada Dua Fungsi Perubah [41]

- Fungsi penjumlahan dan pengurangan

$$(z \pm \Delta z) = (x \pm \Delta x) + (y \pm \Delta y)$$

atau

$$(z \pm \Delta z) = (x \pm \Delta x) - (y \pm \Delta y)$$

$$\Delta z = s_{\bar{z}} = \sqrt{s_{\bar{x}}^2 + s_{\bar{y}}^2}$$

##### Keterangan :

$z$  = Hasil penjumlahan atau pengurangan dari nilai x dan y

$\Delta z$  = Ketidakpastian (Ralat) Mutlak z akibat penjumlahan atau pengurangan nilai x dan y yang memiliki ralat masing-masing

- Fungsi perkalian dan pembagian

$$z = x^m y^n$$

$$\Delta z = s_z = \sqrt{\left(m \frac{z}{x}\right)^2 s_x^2 + \left(n \frac{z}{y}\right)^2 s_y^2}$$

Keterangan :

$z$  = Hasil perkalian atau pembagian dari nilai  $x$  dan  $y$

$m, n$  = bilangan bulat atau pecahan, positif ataupun negatif

$\Delta z$  = Ketidakpastian (Ralat) Mutlak  $z$  akibat perkalian atau pembagian nilai  $x$  dan  $y$  yang memiliki ralat masing-masing

#### Lampiran 4. Pengecekan Nilai Kualitas Radiasi Sumber Sinar-X Energi Rendah

Tabel L4.1 Pengecekan nilai kualitas radiasi pesawat sinar-X tegangan tabung 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M nC/menit	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> nC/menit	Ralat nC/menit
Pengukuran Dengan Filter Tambahan							
101,0	20,34	68	3,893	1,004	3,910	3,910	4,91E-04
101,0	20,34	68	3,893	1,004	3,910		
101,0	20,34	68	3,893	1,004	3,910		
101,0	20,34	68	3,894	1,004	3,911		
101,0	20,34	68	3,891	1,004	3,908		
Pengukuran Dengan Filter Tambahan + HVL							
100,6	20,2	64	1,919	1,007	1,933	1,932	3,77E-04
100,6	20,2	64	1,918	1,007	1,932		
100,6	20,2	64	1,918	1,007	1,932		
100,6	20,2	64	1,917	1,007	1,931		
100,6	20,2	64	1,917	1,007	1,931		

Tabel L4.2 Pengecekan nilai kualitas radiasi pesawat sinar-X tegangan tabung 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M nC/menit	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> nC/menit	Ralat nC/menit
Pengukuran Dengan Filter Tambahan							
100,6	19,75	64	5,407	1,006	5,441	5,441	3,77E-04
100,6	19,75	64	5,407	1,006	5,441		
100,6	19,75	64	5,405	1,006	5,439		
100,6	19,75	64	5,406	1,006	5,440		
100,6	19,75	64	5,406	1,006	5,440		
Pengukuran Dengan Filter Tambahan + HVL							
100,6	19,78	64	2,664	1,006	2,681	2,681	2,47E-04
100,6	19,78	64	2,664	1,006	2,681		
100,6	19,78	64	2,664	1,006	2,681		
100,6	19,78	64	2,663	1,006	2,680		
100,6	19,78	64	2,663	1,006	2,680		

Tabel L4.3 Pengecekan nilai kualitas radiasi pesawat sinar-X tegangan tabung 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M nC/menit	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> nC/menit	Ralat nC/menit
Pengukuran Dengan Filter Tambahan							
100,6	20,1	66	3,181	1,008	3,205	3,205	0
100,6	20,1	66	3,181	1,008	3,205		
100,6	20,1	66	3,181	1,008	3,205		
100,6	20,1	66	3,181	1,008	3,205		
100,6	20,1	66	3,181	1,008	3,205		
Pengukuran Dengan Filter Tambahan + HVL							
100,6	19,83	66	1,577	1,008	1,589	1,589	0
100,6	19,83	66	1,577	1,008	3,205		
100,6	19,83	66	1,577	1,008	3,205		
100,6	19,83	66	1,577	1,008	3,205		
100,6	19,83	66	1,577	1,008	3,205		

## Lampiran 5. Data Hasil Pengukuran Laju Kerma Udara Standar

Tabel L5.1 Laju kerma udara standar pesawat sinar-X tegangan tabung 15 kV

Jarak (cm)	M (nC/menit)	Ralat $\Delta M$ (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Ralat Relatif $\dot{K}_u$ dan $\dot{H}^*(10)$ (%)
Pengukuran pertama					
100	3,910	4,92E-04	11071,732	1129,317	0,90%
200	0,597	2,02E-04	1691,887	172,572	0,90%
300	0,182	1,82E-04	514,106	52,439	0,91%
400	0,072	9,37E-05	203,058	20,712	0,91%
500	0,032	2,97E-05	90,140	9,194	0,90%
600	0,015	3,53E-05	43,823	4,470	0,93%
700	0,008	3,48E-05	22,820	2,328	1,00%
Pengukuran kedua					
100	3,539	1,01E-03	10022,788	1022,324	0,90%
200	0,587	4,96E-05	1661,834	169,507	0,90%
400	0,071	3,98E-05	199,751	20,375	0,90%
700	0,009	1,26E-05	24,268	2,475	0,91%



Tabel L5.2 Laju kerma udara standar pesawat sinar-X tegangan tabung 20 kV

Jarak (cm)	M (nC/menit)	Ralat $\Delta M$ (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Ralat Relatif $\dot{K}_u$ dan $\dot{H}^*(10)$ (%)
Pengukuran pertama					
100	5,465	1,80E-04	15149,867	4893,407	0,90%
200	1,027	2,46E-04	2846,595	919,450	0,90%
300	0,376	6,29E-05	1041,435	336,383	0,90%
400	0,176	5,17E-04	486,610	157,175	0,95%
500	0,093	2,96E-05	258,284	83,426	0,90%
600	0,054	3,77E-05	150,999	48,773	0,90%
700	0,033	4,13E-05	91,757	29,638	0,91%
Pengukuran kedua					
100	5,126	2,70E-04	14209,816	4589,771	0,90%
200	1,032	1,01E-04	2860,901	924,071	0,90%
400	0,176	4,88E-05	487,073	157,324	0,90%
700	0,034	2,31E-05	93,148	30,087	0,90%

Tabel L5.3 Laju kerma udara standar pesawat sinar-X tegangan tabung 25 kV

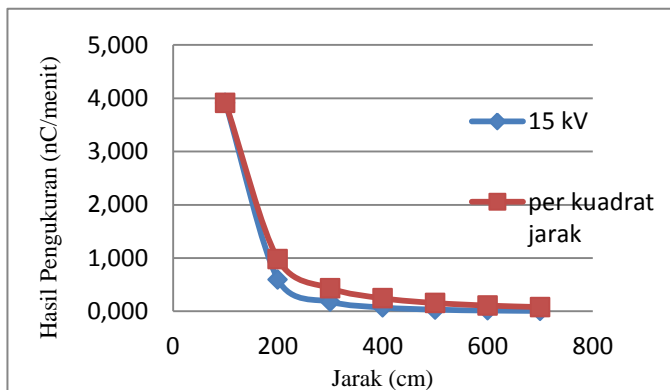
Jarak (cm)	M (nC/menit)	Ralat $\Delta M$ (nC/menit)	$\dot{K}_u$ ( $\mu\text{Gy/h}$ )	$\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Ralat Relatif $\dot{K}_u$ dan $\dot{H}^*(10)$ (%)
Pengukuran pertama					
100	3,205	1,01E-03	8691,472	5006,288	0,90%
200	0,664	1,02E-04	1799,480	1036,500	0,90%
300	0,267	7,04E-05	724,608	417,374	0,90%
400	0,135	5,93E-05	365,326	210,428	0,90%
500	0,078	4,18E-05	210,880	121,467	0,90%
600	0,049	4,75E-05	131,955	76,006	0,91%
700	0,032	3,93E-05	87,356	50,317	0,91%
Pengukuran kedua					
100	3,040	2,53E-04	8243,597	4748,312	0,90%
200	0,675	7,70E-05	1830,501	1054,368	0,90%
400	0,137	5,54E-05	371,083	213,744	0,90%
700	0,033	4,72E-05	88,865	51,186	0,91%

## Lampiran 6. Deviasi Pengukuran Laju Kerma Udara Standar – Pengukuran Pertama dan Kedua

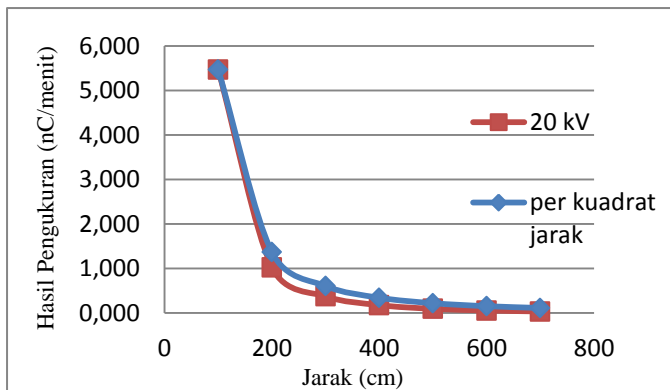
Tabel L6.1 Deviasi Pengukuran Laju Kerma Udara Standar

Jarak (cm)	M (nC/menit)		Deviasi (%)
	Pengukuran I	Pengukuran II	
Tegangan Tabung Pesawat Sinar-X 15 kV			
100	3,910	3,539	0,095
200	0,597	0,587	0,017
400	0,072	0,071	0,014
700	0,008	0,009	0,125
Tegangan Tabung Pesawat Sinar-X 20 kV			
100	5,465	5,126	0,062
200	1,027	1,032	0,005
400	0,176	0,176	0
700	0,033	0,034	0,030
Tegangan Tabung Pesawat Sinar-X 25 kV			
100	3,205	3,040	0,051
200	0,664	0,675	0,017
400	0,135	0,137	0,015
700	0,032	0,033	0,031

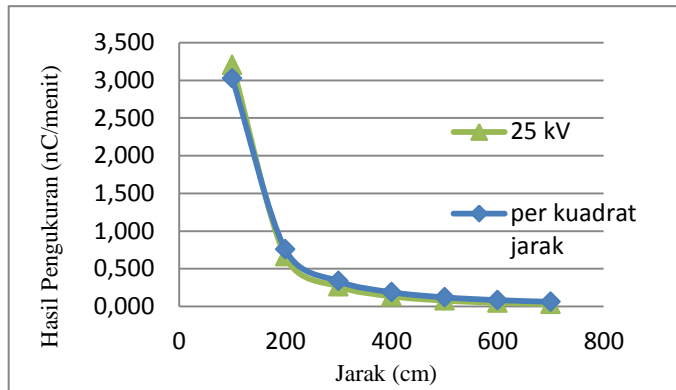
## Lampiran 7. Linearitas Detektor Ionisasi Tipe 2575 C Volume 600 cc



(a) Linearitas detektor untuk tegangan 15 kV



(b) Linearitas detektor untuk tegangan 20 kV



(b) Linearitas detektor untuk tegangan 25 kV

Gambar L7.1 Perbandingan antara karakteristik linearitas detektor dengan hubungan laju dosis terhadap kuadrat jarak

## Lampiran 8. Data Hasil Pengukuran Survei meter

### A. Pengukuran Survei meter Atomtex AT1103M ( SDD =700 cm )

Tabel L8.1 Data pengukuran survei meter Atomtex AT1103M – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091	7,497 nSv/h	0,248 nSv/h
100,7	22	56	8 nSv/h	1,013	8,105		
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091		
100,7	22	56	8 nSv/h	1,013	8,105		
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343	3,033 μSv/h	0,027 μSv/h
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,1 μSv/h	1,013	3,141		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,1 μSv/h	1,013	3,141		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		
100,7	22	56	3,3 μSv/h	1,013	3,343		

Tabel L8.2 Data pengukuran survei meter Atomtex AT1103M – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M nC/menit	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091	7,091 nSv/h	0,320 nSv/h
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091		
100,7	22	56	7 nSv/h	1,013	7,091		
100,7	22	56	6 nSv/h	1,013	6,078		
100,7	22	56	8 nSv/h	1,013	8,105		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993	77,399 μSv/h	0,165 μSv/h
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993		
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993		
100,7	22	56	77 μSv/h	1,013	78,006		
100,7	22	56	77 μSv/h	1,013	78,006		
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993		
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993		
100,7	22	56	77 μSv/h	1,013	78,006		
100,7	22	56	76 μSv/h	1,013	76,993		
100,7	22	56	77 μSv/h	1,013	78,006		

### B. Kalibrasi Survei meter Inspector-USB (SDD = 400 cm)

Tabel L8.3 Data pengukuran survei meter Inspector USB – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,10	1,013	0,101	0,111	0,006
100,7	22	56	0,11	1,013	0,111		
100,7	22	56	0,10	1,013	0,101		
100,7	22	56	0,11	1,013	0,111		
100,7	22	56	0,13	1,013	0,132		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	56	240,2	1,013	243,340	243,603	0,329
100,7	22	56	241,5	1,013	244,657		
100,7	22	56	241,4	1,013	244,555		
100,7	22	56	241,4	1,013	244,555		
100,7	22	56	239,7	1,013	242,833		
100,7	22	56	240,9	1,013	244,049		
100,7	22	56	241,4	1,013	244,555		
100,7	22	56	240,3	1,013	243,441		
100,7	22	56	238,9	1,013	242,023		
100,7	22	56	238,9	1,013	242,023		



Tabel L8.4 Data pengukuran survei meter Inspector USB – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	58	0,14	1,013	0,142	0,126	0,008
100,7	22	58	0,14	1,013	0,142		
100,7	22	58	0,13	1,013	0,132		
100,7	22	58	0,11	1,013	0,111		
100,7	22	58	0,10	1,013	0,101		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	666,4	1,013	675,111	675,455	0,704
100,7	22	58	665,5	1,013	674,199		
100,7	22	58	670,9	1,013	679,670		
100,7	22	58	666,9	1,013	675,617		
100,7	22	58	666,2	1,013	674,908		
100,7	22	58	663,1	1,013	671,768		
100,7	22	58	665,3	1,013	673,996		
100,7	22	58	666,9	1,013	675,617		
100,7	22	58	666,5	1,013	675,212		
100,7	22	58	669,7	1,013	678,454		

Tabel L8.5 Data pengukuran survei meter Inspector USB – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	58	0,13	1,013	0,132	0,134	0,002
100,7	22	58	0,14	1,013	0,142		
100,7	22	58	0,13	1,013	0,132		
100,7	22	58	0,13	1,013	0,132		
100,7	22	58	0,13	1,013	0,132		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	656,5	1,013	655,081	663,704	0,997
100,7	22	58	657,7	1,013	666,297		
100,7	22	58	658,3	1,013	666,905		
100,7	22	58	655,1	1,013	663,663		
100,7	22	58	647,6	1,013	656,065		
100,7	22	58	654,7	1,013	663,258		
100,7	22	58	656,7	1,013	665,284		
100,7	22	58	652,5	1,013	661,029		
100,7	22	58	656,5	1,013	665,081		
100,7	22	58	655,8	1,013	664,372		

### C. Kalibrasi Survei meter RadEye B20-ER ( SDD = 200 cm)

Tabel L8.6 Data pengukuran survei meter RadEye B20-ER – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091	0,095 μSv/h	0,002 μSv/h
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,101		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,101		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	70	1,91 mSv/h	1,013	1,935	1,924 mSv/h	0,004 mSv/h
100,7	22	70	1,92 mSv/h	1,013	1,945		
100,7	22	70	1,90 mSv/h	1,013	1,925		
100,7	22	70	1,89 mSv/h	1,013	1,915		
100,7	22	70	1,89 mSv/h	1,013	1,915		
100,7	22	70	1,90 mSv/h	1,013	1,925		
100,7	22	70	1,88 mSv/h	1,013	1,905		
100,7	22	70	1,89 mSv/h	1,013	1,915		
100,7	22	70	1,90 mSv/h	1,013	1,925		
100,7	22	70	1,91 mSv/h	1,013	1,935		

Tabel L8.7 Data pengukuran survei meter RadEye B20-ER – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	70	0,10 μSv/h	1,013	0,101	0,095 μSv/h	0,002 μSv/h
100,7	22	70	0,10 μSv/h	1,013	0,101		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	70	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	70	4,56 mSv/h	1,013	4,620	4,606 mSv/h	0,004 mSv/h
100,7	22	70	4,55 mSv/h	1,013	4,609		
100,7	22	70	4,56 mSv/h	1,013	4,620		
100,7	22	70	4,56 mSv/h	1,013	4,620		
100,7	22	70	4,53 mSv/h	1,013	4,589		
100,7	22	70	4,54 mSv/h	1,013	4,599		
100,7	22	70	4,55 mSv/h	1,013	4,609		
100,7	22	70	4,54 mSv/h	1,013	4,599		
100,7	22	70	4,55 mSv/h	1,013	4,609		
100,7	22	70	4,53 mSv/h	1,013	4,589		

Tabel L8.8 Data pengukuran survei meter RadEye B20-ER – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	72	0,10 μSv/h	1,013	0,101	0,095 μSv/h	0,002 μSv/h
100,7	22	72	0,10 μSv/h	1,013	0,101		
100,7	22	72	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	72	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
100,7	22	72	0,09 μSv/h	1,013	0,091		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	72	3,67 mSv/h	1,013	3,718	3,732 mSv/h	0,004 mSv/h
100,7	22	72	3,66 mSv/h	1,013	3,708		
100,7	22	72	3,69 mSv/h	1,013	3,738		
100,7	22	72	3,69 mSv/h	1,013	3,738		
100,7	22	72	3,68 mSv/h	1,013	3,728		
100,7	22	72	3,69 mSv/h	1,013	3,738		
100,7	22	72	3,68 mSv/h	1,013	3,728		
100,7	22	72	3,69 mSv/h	1,013	3,738		
100,7	22	72	3,70 mSv/h	1,013	3,748		
100,7	22	72	3,69 mSv/h	1,013	3,738		

#### D. Kalibrasi Survei meter Ludlum M-15

SDD = 400 cm

Tabel L8.9 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 1000  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	66	200	1,013	202,614	202,614	0
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		
100,7	22	66	200	1,013	202,614		

**SDD = 400 cm**

Tabel L8.10 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 1000  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	68	450	1,013	455,882	455,882	0
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,822		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,882		
100,7	22	68	450	1,013	455,822		

**SDD = 400 cm**

Tabel L8.11 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 1000  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	68	500	1,013	506,536	506,536	0
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		
100,7	22	68	500	1,013	506,536		



**SDD = 700 cm**

Tabel L8.12 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 100  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	30	1,013	30,392	30,392	0
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		
100,7	22	60	30	1,013	30,392		

**SDD = 700 cm**

Tabel L8.13 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 100  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	120	1,013	121,569	124,101	0,844
100,7	22	60	125	1,013	126,634		
100,7	22	60	120	1,013	121,569		
100,7	22	60	125	1,013	126,634		
100,7	22	60	125	1,013	126,634		
100,7	22	60	120	1,013	121,569		
100,7	22	60	125	1,013	126,634		
100,7	22	60	125	1,013	126,634		
100,7	22	60	120	1,013	121,569		
100,7	22	60	120	1,013	121,569		

**SDD = 700 cm**

Tabel L8.14 Data pengukuran survei meter Ludlum M15 (skala 100  $\mu\text{Sv/h}$ ) – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M μSv/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> μSv/h	Ralat μSv/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507	0,709	0,124
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
100,7	22	60	0,5	1,013	0,507		
100,7	22	60	1,0	1,013	1,013		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	155	1,013	157,026	158,546	0,774
100,7	22	60	155	1,013	157,026		
100,7	22	60	155	1,013	157,026		
100,7	22	60	160	1,013	162,091		
100,7	22	60	160	1,013	162,091		
100,7	22	60	160	1,013	162,091		
100,7	22	60	155	1,013	157,026		
100,7	22	60	155	1,013	157,026		
100,7	22	60	155	1,013	157,026		
100,7	22	60	155	1,013	157,026		

### E. Kalibrasi Survei meter Babyline 31A

**SDD = 200 cm**

Tabel L8.15 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 1 rad/h) – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203	0,203 mrad/h	0 mrad/h
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162	0,162 rad/h	0 rad/h
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		
100,7	22	56	0,16 rad/h	1,013	0,162		

**SDD = 200 cm**

Tabel L8.16 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 1 rad/h) – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203	0,203 mrad/h	0 mrad/h
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304	0,304 rad/h	0 rad/h
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		
100,7	22	58	0,30 rad/h	1,013	0,304		

**SDD = 200 cm**

Tabel L8.17 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 1 rad/h) – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub>	Ralat
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203	0,203 mrad/h	0 mrad/h
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2 mrad/h	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203	3,033 rad/h	0,002 rad/h
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203		
100,7	22	58	0,21 rad/h	1,013	0,213		
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203		
100,7	22	58	0,21 rad/h	1,013	0,213		
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203		
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203		
100,7	22	58	0,21 rad/h	1,013	0,213		
100,7	22	58	0,21 rad/h	1,013	0,213		
100,7	22	58	0,20 rad/h	1,013	0,203		

**SDD = 400 cm**

Tabel L8.18 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 100 mrad/h) – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	22	1,013	22,288	22,490	0,135
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	23	1,013	23,301		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		
100,7	22	58	23	1,013	23,301		
100,7	22	58	22	1,013	22,288		

**SDD = 400 cm**

Tabel L8.19 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 100 mrad/h) – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	58	1,013	58,758	58,353	0,165
100,7	22	58	57	1,013	57,745		
100,7	22	58	58	1,013	58,758		
100,7	22	58	57	1,013	57,745		
100,7	22	58	58	1,013	58,758		
100,7	22	58	58	1,013	58,758		
100,7	22	58	57	1,013	57,745		
100,7	22	58	58	1,013	58,758		
100,7	22	58	58	1,013	58,758		
100,7	22	58	57	1,013	57,745		



**SDD = 400 cm**

Tabel L8.20 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 100 mrad/h) – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	58	50	1,013	50,654	50,350	0,155
100,7	22	58	49	1,013	49,640		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		
100,7	22	58	49	1,013	49,640		
100,7	22	58	49	1,013	49,640		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		
100,7	22	58	50	1,013	50,654		

**SDD = 700 cm**

Tabel L8.21 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 10 mrad/h) – Tegangan 15 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431	2,401	0
100,7	22	60	2,3	1,013	2,330		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		
100,7	22	60	2,3	1,013	2,330		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		
100,7	22	60	2,3	1,013	2,330		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		
100,7	22	60	2,4	1,013	2,431		

**SDD = 700 cm**

Tabel L8.22 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 10 mrad/h) – Tegangan 20 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	10	1,013	10,131	10,131	0
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		

**SDD = 700 cm**

Tabel L8.23 Data pengukuran survei meter Babyline 81A (skala 10 mrad/h) – Tegangan 25 kV

P kPa	T °C	RH %	M mrad/h	KPT	M x KPT	M <sub>rerata</sub> mrad/h	Ralat mrad/h
Pengukuran Cacah Latar Belakang							
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203	0,203	0
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
100,7	22	56	0,2	1,013	0,203		
Pengukuran Dengan Paparan Radiasi Sinar-X							
100,7	22	60	9,9	1,013	10,029	10,100	0,022
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	10	1,013	10,131		
100,7	22	60	9,8	1,013	9,928		